

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

ACQUISITION DE LA PAROLE D'ENFANTS SOURDS PRÉ-LINGUISTIQUES
AYANT REÇU UN IMPLANT COCHLÉAIRE

THÈSE
PRÉSENTÉE
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DU DOCTORAT EN PSYCHOLOGIE

PAR
MARIE-EVE BOUCHARD

OCTOBRE 2008

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

De quoi on parle, ça n'a pas d'importance. C'est juste parler qui compte (Extrait de *Lux* de Pierre Filion) ;

L'important n'est pas de bien ou mal parler mais de parler (Pierre Falardeau);

Parle, afin que je te voie (Georg Christoph Lichtenberg)...

Ces quelques citations ne sont que quelques-unes pour confirmer ce don inestimable que représente la parole pour l'homme...Par le biais des mots qu'il utilise, il affirme sa volonté, partage ses désirs, confie ses rêves, change le monde. Par le biais des mots qu'il utilise il devient, il existe... La plupart d'entre nous développons tout naturellement cette faculté au fil de nos jeux et de nos expériences des premières années. En revanche, les enfants ayant été privés d'audition en bas âge, ne peuvent acquérir cette habileté. Au contraire, ils se doivent de la gagner au coût d'efforts acharnés et de grande persévérance en ignorant d'avance si le résultat final saura refléter fidèlement l'ampleur du travail qu'ils auront abattu...si tous ces efforts leur permettront de récupérer ce qui leur a été si injustement enlevé...

Mieux comprendre comment se développe la parole dans un contexte unique et atypique est une aventure ardue et complexe mais oh combien fascinante et dont le dénouement ne peut que nous faire réaliser que le questionnement ne sera jamais tout à fait terminé...En effet, les résultats obtenus nous rappellent que l'unicité de l'être humain ne peut se résumer en quelques lignes...bien que ces dernières soient, pour l'auteure, le fruit de plusieurs années de travail... et même une véritable quête personnelle... Toutefois, si le cheminement doctoral s'avère initialement un projet individuel, il devient très rapidement le travail de toute une équipe sans qui l'aboutissement ne saurait être garanti...Votre présence, vos encouragements mais surtout votre confiance ont fait toute la différence...Merci...

Au Dr. Henri Cohen, professeur au Département de psychologie de l'UQAM qui fut l'un des premiers à croire en moi et à encourager ma motivation. Sa présence a fait en sorte de me donner les outils nécessaires à la poursuite de mes études.

À ma co-directrice, Dre. Lucie Ménard, professeure au Département de linguistique et de didactique des langues de l'UQAM, pour la constance...celle de sa présence, de son soutien, de sa patience, de sa rigueur et de sa perspicacité.

Au Dre. Marie-Thérèse Le Normand, professeure au Département de psychologie de l'Université Paris Descartes, pour ses précieux conseils dans les moments de rédaction où notre connaissance n'est plus suffisante.

Au Dr. Peter Scherzer, professeur au Département de psychologie de l'UQAM, pour ses conseils et sa bienveillance...dans les moments de doute, votre enthousiasme a toujours su m'inspirer.

À M. Jean Bégin, statisticien au Département de psychologie de l'UQAM, pour son éternelle patience face à mon ignorance statistiquement significative et sa disponibilité sans faille dans mes urgences doctorales! Merci Jean de n'avoir jamais désespéré à tenter de me faire comprendre l'incompréhensible!

À toute l'équipe du Laboratoire d'audiologie de l'Hôpital pour Enfants de l'Est Ontario à Ottawa : Dr. Janet Olds, Dr. Elizabeth Fitzpatrick, Dr. Andrée Durieux-Smith, Mrs Joanne Withingham et Mrs Joanne Mayne....Each and every Summer that I spent with you was a gift that was offered to me. Thank you for your trust, your support and your neverending patience with my "language limitations".

À mes parents...mon père, qui a su m'inculquer le goût du dépassement de soi et qui n'a jamais hésité à me fournir, au prix de nombreux sacrifices, les conditions me permettant de concrétiser mes rêves. À ma mère, merci pour ton amour, ton écoute, tes encouragements et ton dévouement tous inconditionnels.... S'il n'y a aucune recette pour devenir une mère parfaite, tu as certainement su trouver les mille et un ingrédients pour être la mère dont j'avais besoin pour grandir et me réaliser.

À Eric, ta présence, tes attentions et ton amour des derniers instants ont fait toute la différence... Sans toi je n'aurais jamais croisé le fil d'arrivée... Comment te remercier de toujours voir le plus beau en moi et vouloir le meilleur pour moi...

À Caroline É., dont l'amitié qui guérit et rattache à la vie n'a pas de frontière. J'admire toujours autant ton courage, ta détermination et ta lucidité... J'espère en percer un jour le secret; Marie-Claude... « l'extension de moi » si précieusement retrouvée après toutes ces années... Te savoir dans ma vie fait toute la différence... I'll be there à tout jamais... quoiqu'il arrive!

À tous ceux et celles que j'ai croisés, tout au long de ce parcours et qui ont su se tailler une place dans mon cœur et mes pensées : Sophie (ma sœur des premiers moments des cycles supérieurs...), Christine (les fameux soupers de lab... tellement inspirants !), Sanja (toujours présente pour régler les petits pépins) ; Sophie, Jérôme, Vincent, Joanna, Annie et Lucie du Labo de phonétique (mes collègues adoptifs du 4^{ième} étage) : Annie (Victoria... j'y pense encore !) ; Bruno (toujours présents en cas de doute, avec les mots et les conseils qu'il me fallait... J'espère de tout cœur qu'un jour nous pourrions concrétiser notre projet !) ; Caroline B.-G. (pour ton humanisme et ta sérénité... comment peut-on être si sage aussi jeune?) ; Martine et Marie-Josée (mes premières années avec vous sont précieuses et ne seront jamais oubliées), Dr. Francine Lussier (votre confiance des derniers mois, vos encouragements face à ce nouveau cheminement de clinicienne que j'entreprends et vos conseils se sont avérés inestimables...) ; Victor (ton amitié et ta musique me rappellent que la vie est belle... et que les artistes sont sans doute les ingénieurs de l'âme humaine!).

Finalement, j'aimerais remercier 6 amies fidèles Où, Quand, Comment, Qui, Quoi et Pourquoi... sans qui ces années de recherche n'auraient pas été les mêmes, puisqu'elles sont celles ayant accompagné chacune de mes interrogations...

La réalisation de ce projet n'aurait pas été possible sans le soutien financier du Conseil de recherche en sciences humaines du Canada (CRSH) ainsi que du Fonds québécois de la recherche sur la société et la culture (FQRSC).

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	i
TABLE DES MATIÈRES.....	iv
LISTE DES TABLEAUX.....	vi
LISTE DES FIGURES.....	vii
RÉSUMÉ.....	viii
CHAPITRE I	
CONTEXTE THÉORIQUE.....	1
1.1 Introduction.....	1
1.2 Acquisition de la parole chez l'enfant normoentendants.....	3
1.2.1 Développement vocalique et consonantique.....	3
1.2.1.1 Développement vocalique.....	3
1.2.1.2 Développement consonantique.....	8
1.2.2 Développement physiologique.....	12
1.2.3 Acquisition du contrôle moteur.....	13
1.2.4 Perception auditive.....	17
1.2.5 Imitation.....	20
1.2.6 Feedback auditif.....	22
1.2.7 Perception visuelle.....	23
1.2.8 Période critique et exposition à la parole.....	25
1.3 Surdité, parole et implant cochléaire.....	31
1.3.1 Fonctionnement de l'implant cochléaire.....	32
1.3.2 Critères de sélection.....	35
1.3.3 Capacités perceptuelles auditives à la suite de l'implant cochléaire	36
1.3.4 Surdité et organisation cérébrale.....	38
1.3.5 Production de parole chez les enfants sourds avant	
l'implantation cochléaire.....	42
1.3.6 Production de parole chez les enfants sourds après	
l'implantation cochléaire.....	44
1.3.6.1 Acquisition des voyelles et des consonnes.....	44
1.3.6.2 Intelligibilité.....	51

1.3.7 Influence de l'âge à l'implantation.....	54
1.4 Limite des études antérieures et objectifs du projet actuel.....	56
1.5 Introduction aux articles.....	59
CHAPITRE II	
ARTICLES.....	61
2.1 Article 1.....	61
2.2 Article 2.....	89
2.3 Article 3.....	130
CHAPITRE III	
DISCUSSION GÉNÉRALE.....	157
3.1 Acquisition de la parole post-implantation.....	157
3.2 Influence de l'âge à l'implantation.....	159
3.3 Conclusion.....	163
ANNEXE A FORMULAIRE DE CONSENTEMENT	165
ANNEXE B ATTESTATION DE COMPENSATION	167
BIBLIOGRAPHIE.....	168

LISTE DES TABLEAUX

ARTICLE 2

Tableau		Page
1	Caractéristiques démographiques et cliniques des participants implantés.....	121
2	Nombre d'énoncés utilisés pour les analyses.....	123
3	Pourcentage de voyelles non-arrondies antérieures, arrondies antérieures, centrales, arrondies postérieures et nasales produites pour chaque catégorie vocalique, 6, 12, et 18 mois post-implantation.....	124
4	Pourcentage de consonnes occlusives, fricatives, liquides et glides Produites pour chaque catégorie consonantique, 6, 12, et 18 mois post-implantation.....	125
5	Résultats des ANOVAS pour les diverses catégories linguistiques	126

ARTICLE 3

Tableau		Page
1	Caractéristiques démographiques et cliniques des participants Implantés.....	154
2	Pourcentage d'accord inter-juges entre les auditeurs expérimentés et naïfs pour les voyelles.....	155
3	Pourcentage d'accord inter-juges entre les auditeurs expérimentés et naïfs pour les consonnes.....	156

LISTE DES FIGURES

Figure		Page
1	Coupe sagittale de la production des voyelles	5
2	Classification des voyelles françaises.....	6
3	Différenciation graduelle des catégories vocaliques par augmentation de la dispersion intergroupe.....	7
4	Différenciation graduelle des catégories vocaliques par diminution de la dispersion intra-groupe.....	8
5	Coupe sagittale de la production des consonnes.....	9
6	Classification des consonnes françaises.....	10
7	Schéma des principales structures de l'appareil bucco-phonatoire montrant la grande ressemblance entre le singe et le nouveau-né.....	12
8	Schéma des principales structures de l'oreille.....	32
9	Anatomie de l'organe de Corti et relation avec le nerf auditif.....	33
10	Illustration d'une oreille saine et d'une oreille atteinte de surdité sensorielle.....	33
11	Électrodes stimulant les fibres du nerf auditif.....	34
12	Principales composantes de l'implant cochléaire.....	35

RÉSUMÉ

En stimulant le nerf vestibulo-cochléaire, les électrodes de l'implant cochléaire contribuent à la restauration, au moins partielle, de la conscience sonore en permettant aux afférences acoustiques de recevoir un traitement cortical. Ce projet de recherche avait comme visée principale d'effectuer un suivi longitudinal à moyen terme d'enfants sourds pré-linguaux issus de milieux francophones et ayant reçu un implant cochléaire dans le but de décrire les patrons de développement au cours des premières années d'expérience auditive. Un second objectif était de clarifier le rôle de l'âge à l'implantation sur les productions. Le langage spontané de participants a été enregistré et filmé au cours d'une séance de jeu libre standardisé et les séquences de parole ont ensuite été soumises à diverses analyses. L'étude des inventaires vocaliques et consonantiques 6, 12 et 18 mois post-chirurgie montre des progrès manifestes dès 6 mois post-implantation. Tant pour les voyelles que pour les consonnes, la visibilité des phonèmes semble avoir influencé l'ordre d'acquisition dans les premiers mois d'expérience auditive, mais les patrons de développement se sont graduellement normalisés. Dans la seconde étude, 40 auditeurs naïfs et 2 transpositeurs expérimentés ont été soumis à un test de perception visant à identifier les syllabes produites par un groupe de 12 enfants sourds, 6, 18 et 36 mois suivant leur restauration sensorielle. Il était prédit qu'une augmentation du taux d'accord inter-juges entre les auditeurs naïfs et expérimentés reflétait une amélioration de l'intelligibilité. Les analyses ont révélé des améliorations plus importantes pour les voyelles que pour les consonnes. Dans les 2 études, l'impact de l'âge à l'implantation ne s'est pas révélé significatif suggérant que des variables liées à l'environnement étaient susceptibles d'être de meilleurs prédicteurs que ceux liés à des facteurs strictement physiologiques.

CHAPITRE 1

CONTEXTE THÉORIQUE

1.1 Introduction

Les enfants qui naissent sourds ou qui le deviennent avant avoir pu développer un premier langage oral, c'est-à-dire sourds prélinguaux, n'ont pas accès aux mêmes informations que leurs pairs entendants. Le développement de la parole chez ces enfants repose principalement sur des informations visuelles et tactiles (Kuhl & Meltzoff, 1982).

L'implant cochléaire est un appareil qui stimule électriquement les fibres du nerf vestibulo-cochléaire grâce à une série d'électrodes insérées dans la cochlée. Ces électrodes permettent ainsi de contourner la première étape du traitement neuronal auditif, effectuée par les cellules ciliées endommagées ou absentes dans le cas de surdité sensorielle. L'implant cochléaire vise donc une restauration, au moins partielle, de la conscience sonore en permettant aux afférences acoustiques de recevoir un traitement cortical.

Or, si un nombre important d'études ont pu conclure à une amélioration des habiletés perceptives des enfants sourds prélinguaux implantés (Manrique, Cervera-Paz, Huarte, Molina, 2004; Svirsky, Teoh, Neuburger, 2004), peu de travaux se sont intéressés aux aspects liés à la production de la parole. De telles études aideraient à préciser les effets de la privation acoustique en bas âge. De plus, l'importante variabilité interindividuelle observée dans les performances langagières à la suite de cette chirurgie met en lumière l'existence de facteurs

socio-démographiques et cliniques qui empêchent de conclure à propos des capacités réelles de ces enfants à développer la parole. Parmi ces facteurs, on retrouve l'âge à l'implantation qui semble être la variable la plus fortement associée aux progrès attendus après cette restauration sensorielle partielle.

Ce projet de recherche a donc deux objectifs principaux. Le premier est celui d'examiner, dans une perspective phonétique et phonologique, l'émergence des systèmes vocaliques et consonantiques d'enfants sourds prélinguaux issus de familles francophones au cours des trois premières années suivant la restauration sensorielle. Le second est de clarifier l'influence de l'âge à l'implantation sur les performances obtenues.

Les résultats d'une telle recherche sont pertinents d'un point de vue théorique et clinique. Par l'exposition à des conditions sensorielles particulières, les enfants sourds prélinguaux présentent un système bucco-phonatoire développé normalement au plan morphologique mais exploité différemment, sur la base d'informations principalement visuelles et par la suite complétées par des stimulations auditives. Les performances des enfants ayant subi une restauration sensorielle permettent d'approfondir la compréhension du rôle des systèmes moteurs et sensoriels (auditifs et visuels) pour le développement de la parole.

Ces enfants avec implant cochléaire sont également soumis à une expérience auditive unique qui diffère de celle que reçoivent les enfants entendants tant du point de vue de la qualité que du moment dans le développement durant laquelle elle se produit. En raison de ces différences, décrire la manière dont leurs capacités de production évoluent suite à la restauration sensorielle permet d'évaluer l'impact que peuvent avoir diverses périodes de privation sensorielle en bas âge, sur le développement de la parole. Il devient ainsi possible de préciser davantage les mécanismes par lesquels ces enfants ainsi que leur pairs entendants acquièrent la parole.

Par ailleurs, la question de la période critique dans le développement de la parole est une question toujours actuelle dans la littérature. Or, aucun résultat ne permet de confirmer

ou d'infirmier l'existence d'une telle période. En étudiant l'impact de l'âge lors de la restauration sensorielle sur le développement de la parole, les résultats de cette recherche sont donc susceptibles de mettre en lumière l'existence d'une fenêtre temporelle durant laquelle l'accès à l'information auditive peut s'effectuer chez un organisme minimalement affecté par la privation ou encore suffisamment plastique pour ne pas garder de séquelles de cette période de privation sensorielle.

D'un point de vue clinique, des réponses aux questions précédentes s'avèrent une source précieuse d'informations pour les praticiens dont le travail vise à déterminer les périodes optimales pour l'implantation et à évaluer les risques et les bénéfices de cette procédure invasive, aux conséquences irréversibles.

1.2 Acquisition de la parole chez l'enfant normoentendant

Très tôt dans sa vie, le nouveau-né remarque que les enchaînements de sons provenant de la bouche des adultes qui l'entourent possèdent le pouvoir d'influencer ce qui arrive dans son univers. Il n'est donc pas surprenant que le bébé aspire à développer lui aussi cette habileté. Malgré un tel désir, la maîtrise de la parole implique pour lui une succession de défis qu'il se doit de relever s'il veut être en mesure de se faire comprendre lui aussi par son environnement. Par exemple, il doit identifier les différents sons qui lui parviennent dans un discours continu, sans négliger le fait qu'il doit apprendre à maîtriser les multiples structures de son appareil bucco-phonatoire pour être en mesure de produire les consonnes et les voyelles de sa langue. La première partie de ce travail vise donc à survoler les différentes étapes et mécanismes qui mènent à l'émergence de la parole chez l'enfant entendant. Cette connaissance facilite la compréhension des phénomènes atypiques fréquemment observés chez les enfants sourds prélinguaux qui s'expriment oralement.

1.2.1 Développement vocalique et consonantique

1.2.1.1 Développement vocalique

Une série d'étapes sont généralement traversées par le jeune enfant avant qu'il ne soit en mesure de pouvoir développer les systèmes phonétiques et phonologiques de sa langue maternelle. Le développement phonétique implique l'étude de l'acquisition des sons de la

parole appelés phones. Alors que celui phonologique s'intéresse aux sons ayant une valeur linguistique, les phonèmes qui sont en relation avec un signifié.

Les auteurs ne s'accordent généralement pas sur les différents stades du développement pré-linguistique de l'enfant au cours des deux premières années de vie. Néanmoins, tous s'accordent sur l'existence de phases bien distinctes de vocalisations, que ce soit en anglais (Vihman & Miller, 1988; Stoël-Gammon & Cooper, 1984; Oller, 1978) ou dans d'autres langues (Rough, Landberg & Lundberg, 1989; Koopmans-van Beinum and van der Stelt, 1986). Ces périodes fournissent les patrons de production simples à partir desquels les formes plus complexes peuvent émerger. En effet, les babillages canonique et diversifié sous-tendraient les premiers mots et proto-mots qui contiendraient les premières voyelles et consonnes. Ainsi, à partir d'un nombre limité de productions différentes, les systèmes vocaliques et consonantiques vont graduellement s'enrichir.

Les voyelles sont généralement les premiers phonèmes à faire leur apparition dans le répertoire phonétique du jeune enfant. De ce fait, elles ont un important rôle à jouer dans les premières tentatives de communication orale de l'enfant (Ertmer & Mellon, 2001).

La production des voyelles requiert la vibration des cordes vocales ainsi que le passage de l'air tout au long d'une cavité orale ouverte.

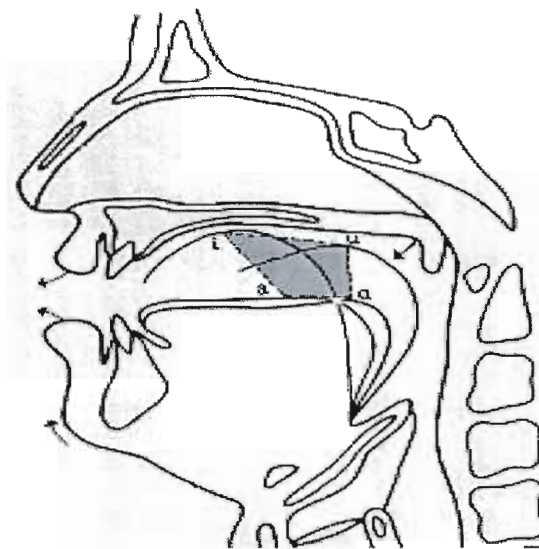


Figure 1 Coupe sagittale de la production des voyelles

La langue française classifie généralement les voyelles par un système de traits à multiples valeurs qui permet de diviser les axe horizontal et vertical du trapèze vocalique. L'axe horizontal rend compte du mode articuloire qui se définit en termes d'ouverture buccale, i.e. de l'espace compris entre la langue et la voûte palatine (fermées, mi-fermées, mi-ouvertes et ouvertes) tandis que l'axe vertical spécifie le lieu d'articulation, i.e. la position de la langue dans la cavité orale (antérieure, centrale et postérieure). Certaines voyelles nécessitent également la participation de lèvres (arrondies/non-arrondies). Finalement, il est à noter que le système vocalique français inclut quatre voyelles nasales dont la production implique que l'air s'échappe à la fois par la cavité nasale et orale.

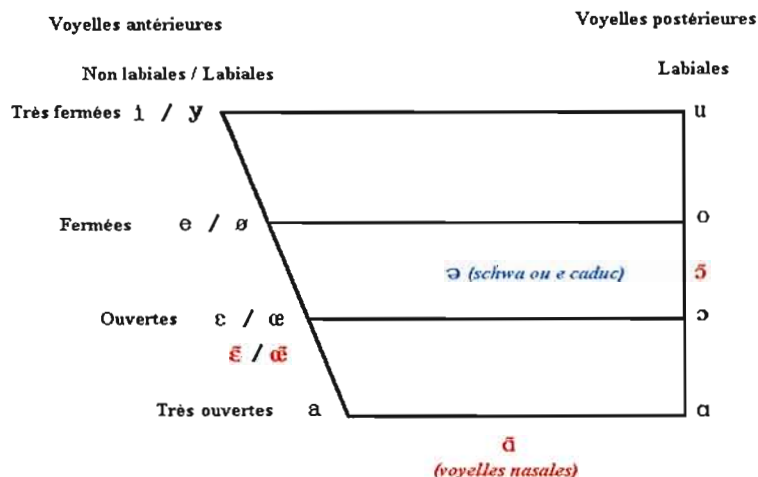


Figure 2 Classification des voyelles française

Un nombre relativement limité d'études se sont intéressées au développement des voyelles comparativement à celui des consonnes (Stoel-Gammon & Herrington, 1990). En général, les chercheurs abordent superficiellement les voyelles à l'intérieur même de leur discussion sur les consonnes et justifient une telle approche par le fait que les voyelles apparaissent généralement avant les consonnes et présentent des taux d'erreurs moins élevés. Pourtant la capacité à produire les voyelles est très importante puisque ces phonèmes forment le noyau de tous les mots et permettent d'informer à propos de la ou des consonnes qui leur sont adjacentes. La production incorrecte des voyelles peut donc mener à une réduction significative de l'intelligibilité (Fudge, 1969).

En révisant la littérature existante sur la production des voyelles des enfants normo-entendants âgés entre 12 et 36 mois, il est possible de noter des tendances de développement (Lalevée, 2003; Mac Whinney & Snow, 2000, 1991, 1985 ; Selby, Robb, & Gilbert, 2000; Brosda, 1999; 1998; Davis & MacNeilage, 1990 ; Stoel-Gammon & Herrington, 1990; Kent & Bauer, 1985; Parschall, 1983; Hare, 1983; Ingram, 1976). La principale période d'émergence vocalique se produit avant 36 mois. En ce qui concerne le lieu articulatoire, les voyelles centrales sont les premières à apparaître suivies par les antérieures et postérieures.

Pour le trait d'aperture, les voyelles ouvertes et mi-ouvertes précèdent généralement les fermées et les mi-fermées. Finalement, les voyelles nasales sont les dernières à faire leur apparition, et sont généralement maîtrisées entre 18 et 36 mois.

L'émergence du système vocalique peut également être étudiée en ayant recours aux données acoustiques qui permettent de suivre l'évolution formantique des productions de l'enfant pour situer l'acquisition de la parole dans un plan F1/F2. Deux tendances semblent caractériser le développement vocalique au plan acoustique : la différenciation graduelle des catégories vocaliques ainsi que la diminution générale des valeurs formantiques. La différenciation des catégories se traduirait par deux phénomènes : premièrement par une augmentation de la dispersion intergroupe, qui refléterait la séparation de plus en plus importante des différentes voyelles sous l'expansion graduelle des formants.

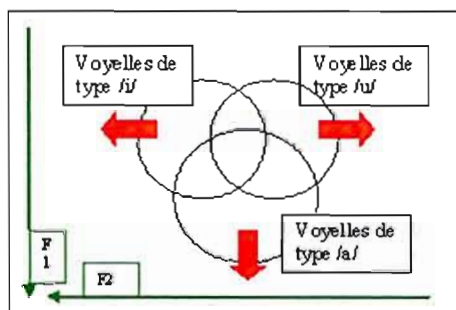
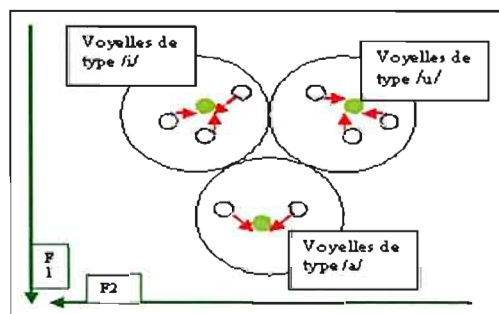


Figure 3 Différenciation graduelle des catégories vocaliques par augmentation de la dispersion intergroupe (Source Goud, 2004)

La seconde manifestation du développement serait une diminution de la dispersion intragroupe, i.e. de la variabilité des valeurs formantiques des productions vocaliques identifiées comme une même voyelle. Cette différenciation serait rendue possible par un contrôle de plus en plus fin des articulateurs. C'est ainsi, que les productions de /a/ et /i/ s'avéreraient stables vers 36 semaines tandis que celles de type /u/ le seraient plus tardivement (Buhr, 1980).



● : prototype de la voyelle
○ : autres productions, perçues comme le même son prototypique

Figure 4 Différenciation graduelle des catégories vocaliques par diminution de la dispersion intra-groupe (Source : Goud, 2004)

La diminution de la valeur générale des formants serait la conséquence directe du développement anatomique. Le jeune enfant ne peut produire que des voyelles ayant des fréquences formantiques correspondant aux fréquences de résonance que lui permet son court conduit vocal. Puisque les fréquences de résonance des cavités sont inversement proportionnelles à leur longueur, les productions vocaliques de l'enfant seraient par conséquent composées de fréquences plus élevées. C'est ainsi que Buhr (1980) et Lieberman (1980) notent qu'entre l'âge de 16 et 64 semaines, les fréquences des formants ainsi que la dispersion intergroupe varieraient très peu. Cette tendance s'inverserait au cours de la période s'étendant de la 125^{ième} à la 161^{ième} semaine où une diminution générale de la fréquence des formants serait observable.

1.2.1.1 Développement consonantique

Les consonnes sont des phonèmes produits par le rétrécissement partiel ou complet du conduit vocal.

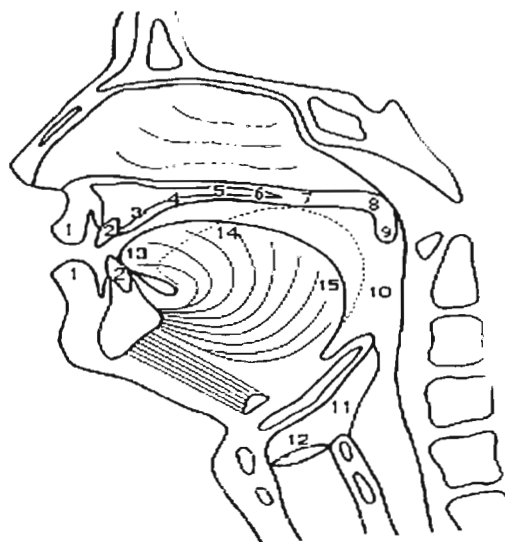


Figure 5 Coupe sagittale de la production des consonnes

La description des consonnes s'effectue généralement au moyen de trois critères articulatoires : le mode et le lieu ainsi que le voisement. Le mode articulatoire représente la façon dont l'air s'échappe du conduit vocal. Les consonnes occlusives résultent d'un blocage total du chenal expiratoire en un point quelconque, alors que celles constrictives et fricatives se réalisent au moyen d'un rétrécissement important du conduit vocal, avec écoulement continu de l'air par le biais de l'espace retreint. Le lieu articulatoire est l'endroit où l'articulateur principal produit l'occlusion ou la constriction. Finalement, le voisement implique la présence ou l'absence de la vibration des cordes vocales

Mode d'articulation		Lieu d'articulation					
Occlusive		Bi-labiale	Labio-dentale	Apico-dentale	Dorso-palatale	Dorso-vélaire	Dorso-uvulaire
Sourde	Orale	p		t		k	
	Nasale						
Sonore	Orale	b		d		g	
	Nasale	m		n		ɲ	
Constrictive							
Sourde	Orale		f	s		ʃ	
Sonore	Orale		v	z		ʒ	
Liquide				l			R

Figure 6 Classification des consonnes françaises

Une approche classique dans l'étude du développement des consonnes consiste à établir un critère d'acquisition qui permet de définir, pour chaque consonne, l'âge auquel un pourcentage significatif d'enfants provenant d'une population normale maîtrise ces phonèmes dans les trois positions d'un mot, i.e. celle initiale, médiane et finale. Pour la langue anglaise, trois études servent généralement de référence pour ce type de recherche. Celle de Wellman et al., (1931) qui ont testé un peu plus de 200 enfants âgés entre deux et six ans, celle de Poole (1934) avec des participants entre deux ans et huit ans et finalement, celle de Templin (1957) dont l'objectif était d'actualiser les résultats des deux études précédentes en suivant le développement de près de 500 enfants âgés entre trois et huit ans.

Une quatrième étude, celle de Sander publiée en 1972, critique l'analyse classique utilisée dans les études précédentes. Selon lui, les résultats obtenus reflètent davantage des âges limites d'acquisition plutôt que des performances moyennes. S'il possible de prédire assez justement l'âge d'acquisition pour une variété de comportements durant les premières années de vie, tel n'est pas le cas pour l'âge auquel les enfants produisent des sons spécifiques. Il suggère donc une approche alternative pour étudier le développement

articulatoire. Au lieu de définir l'acquisition en termes de maîtrise dans les trois positions du mot, il propose d'utiliser un critère moins rigoureux qu'il nomme « production dominante » (*customary production*) et qui consiste en la production correcte sur deux des trois positions dans le mot par la majorité des enfants. Il recommande également de tenir compte de la variabilité du développement, en incluant, dans les inventaires, l'âge de production dominante de chaque son ainsi que l'âge représentant la limite supérieure pour son acquisition. En utilisant de tels critères et en analysant à nouveau les données de Wellman et al., (1931) et de Templin (1957), Sander (1972) obtient des inventaires qui démontrent une plus grande variabilité. Des résultats comparables sont obtenus quelques années plus tard par Prather, Hedrick et Kern (1974).

Au plan du développement, les résultats des études précédentes permettent d'esquisser un patron global d'acquisition (Prather et al., 1974; Sander, 1972; Templin, 1957). Tout d'abord, la période principale de développement se situe entre deux et sept ans. Vers deux ans les nasales bilabiales /m/ et alvéolaires /n/, les semi-consonnes (/w/, /j/, /ɥ/) ainsi qu'une première série d'occlusives bilabiales /p/, /b/ font leur apparition. Au cours de la troisième et de la quatrième année émergent les dernières occlusives, alvéolaires et vélaires (/t/, /d/, /k/, /g/) ainsi que la liquide alvéolaire /l/. Au cours de la cinquième année, une nouvelle classe de consonnes, les fricatives, commencent à faire leur apparition dans les inventaires avec les labiodentales /f, v/ ainsi que les alvéolaires et postalvéolaires sourdes /s/ et /ʃ/. La seconde liquide vélaire /r/ est également acquise au cours de cette période. Finalement au cours de la sixième année, les inventaires consonantiques sont complétés avec l'apparition des fricatives alvéolaires et postalvéolaires sonores /z/ et /ʒ/.

En conclusion, il est important de mentionner que les patrons présentés pour les voyelles et les consonnes sont approximatifs. Tel que soutenu par Sander (1972), la variabilité entre les enfants est un phénomène qu'il ne faut pas ignorer. Crystal (1981) décrit d'ailleurs une série de facteurs pouvant influencer l'ordre d'acquisition des phonèmes. Ceux-ci incluent des facteurs d'ordre articulatoire, phonologique, lexical, grammatical, social, de complexité auditive, de maturité physiologique, et de fréquence d'utilisation dans la langue maternelle.

1.2.2 Développement physiologique

Un des premiers facteurs à la base des changements observés dans les capacités de production est le développement anatomique du système phonatoire. L'évolution constante de l'appareil phonatoire impose à l'enfant certaines contraintes qu'il devra graduellement apprendre à maîtriser. Au cours des premières années de sa vie, le conduit vocal de l'enfant passe d'une physionomie s'apparentant davantage à celle d'un primate pour graduellement évoluer vers celle que l'on retrouve chez l'adulte humain (Kent & Murray, 1982) (Figure 7)

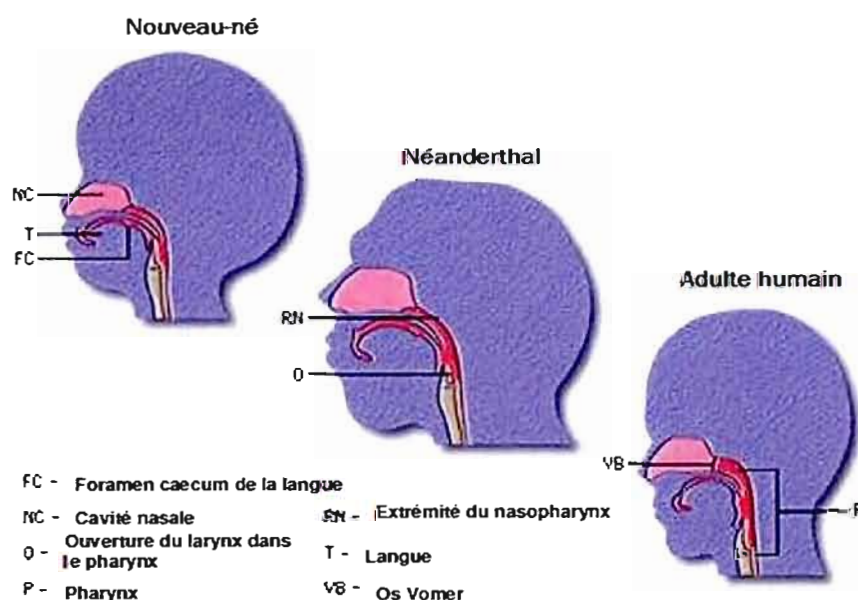


Figure 7 Schéma des principales structures de l'appareil bucco-phonatoire montrant la grande ressemblance entre le singe et le nouveau-né

Au cours de la maturation, plusieurs modifications prennent place. Parmi celles-ci on mentionne : l'allongement du conduit vocal (Kent & Murray, 1982) ; le développement musculaire de la langue qui permet une meilleure motilité antéro-postérieure (Boysson-Bardies, 1999), et finalement les lèvres qui, en modifiant leur largeur et leur capacité d'aperture, permettent leur resserrement ainsi qu'une meilleure protrusion (Kent, 1997). Tous ces changements se répercutent sur les valeurs acoustiques des productions émises par l'enfant et accroissent également sa capacité à articuler certains phonèmes.

1.2.3 Acquisition du contrôle moteur

Un contrôle de plus en plus fin et précis de l'appareil phonatoire constitue un autre facteur à la base des changements consonantiques et vocaliques décrits précédemment. Dans leur théorie du *Frame then Content*, MacNeilage et Davis (1990) soutiennent qu'au cours du babillage canonique et des premiers mots, la production de la parole résulte uniquement de l'oscillation rythmique de la mandibule (*frame*) accompagnée de phonation. Sous la pression exercée par les besoins communicationnels de plus en plus variés, l'acquisition du contrôle indépendant des articulateurs permet graduellement à l'enfant de réduire l'utilisation des caractéristiques universelles du babillage afin de prioriser les caractéristiques spécifiques de sa langue maternelle, i.e. le *content*. Ce changement apparaît en premier lieu dans les aspects prosodiques, puis dans la production des voyelles avant d'atteindre celles des consonnes et des associations phonotactiques.

Ainsi, au cours de sa première année, le jeune enfant n'est pas physiquement apte à produire des sons similaires à ceux de l'adulte. Graduellement et à des rythmes différents selon les articulateurs, l'enfant apprend à les faire fonctionner et à coordonner leur activité (Nittrouer, 1995). Des études récentes suggèrent que le contrôle des articulateurs se précise jusqu'à l'adolescence (Smith & Goffman, 1998 ; Sharkey & Folkins, 1985). Studdert-Kennedy (1991) décline le processus de maturation motrice comme une succession de cycles de différenciation et d'intégration. Ainsi, les vocalisations précoces sous-tendraient la différenciation des activités respiratoires et vocales. Le babillage canonique permettrait l'intégration des patrons de constriction et d'ouverture du tractus vocal (de non-parole) dans des structures syllabiques. La période du babillage varié et des premiers mots favoriserait la différenciation des gestes d'ouverture et de fermeture des syllabes successives donnant l'impression de variations entre consonnes et voyelles (différenciation des composantes gestuelles). Et enfin, le stade de l'expansion lexicale (15-24 mois) porterait l'intégration des patrons de gestes récurrents dans des segments phonétiques (intégration des patrons de gestes dans des structures perceptuo-motrices que l'on connaît comme consonnes et voyelles).

Green, Moore, Higashikawa, Steeve (2000) envisagent eux aussi la succession de cycles dans le développement du contrôle moteur. Dans leur conception, les phases de différenciation et d'intégration sont préservées, mais une dernière phase peut être ajoutée. En d'autres termes, ils distinguent trois phases principales du développement oromoteur, à savoir la différenciation, l'intégration et le raffinement. La première phase régit l'évolution d'un mouvement de base simple vers un mouvement plus complexe et spécialisé. Au cours de l'intégration, les comportements moteurs acquis sont coordonnés aux contrôles initiaux. Enfin, par le raffinement, les cibles vont subir une spécialisation plus fine. En impliquant les structures des lèvres et de la mâchoire, il est possible de dégager la séquence suivante (Green, 1998) : Un premier stade, vers l'âge de 1 an, se caractérise par la prédominance du contrôle de la mâchoire. Ce premier résultat corrobore d'ailleurs celui de la théorie de Davis et Mac Neilage (1990). La seconde phase, entre 2 et 6 ans, marque l'acquisition du contrôle indépendant des lèvres supérieure et inférieure, ainsi que de celui de la langue. Finalement, la troisième période s'étendant de la sixième année à l'âge adulte, se caractérise par un raffinement de la coordination des structures motrices. Ainsi, l'émergence du contrôle articulaire peut alors être décrite selon un cheminement au cours duquel différentes phases s'enchaînent. La première sous-tend la mise en place de patrons gestuels autonomes, la seconde l'assimilation de nouveaux patrons plus complexes et la dernière suppose que les modèles acquis se spécialisent et s'affinent pour se rapprocher des configurations cibles.

Le développement du contrôle moteur implique non seulement la capacité à produire des cibles isolées mais comprend également celle de la maîtrise de la dynamique articulaire. Ce phénomène repose généralement sur un phénomène appelé la coarticulation. Pour Perkell (1986), la coarticulation est la superposition de multiples influences sur le mouvement d'un articulateur, ces influences pouvant provenir des exigences acoustico-phonétiques de contexte (ex. de [bo] vs. [ba]) ou d'interactions physiques avec d'autres articulateurs (= coproduction, comme dans [bapap] où la lèvre supérieure démarre son geste avant celui de la lèvre inférieure pour réaliser l'occlusion du premier [p]). Pour le locuteur, la coarticulation permet une grande économie articulaire. Bien qu'elle implique une variation dans les caractéristiques des sons produits, la coarticulation s'avère également utile pour l'auditeur puisqu'elle l'informe sur la nature des sons en contexte.

Deux types de coarticulation existent, celle persévératrice (gauche-droite) où un segment influence celui qui le suit et celle anticipante (droite-gauche) où un son influence celui qui le précède. S'il est fréquent d'attribuer la coarticulation persévératrice aux propriétés d'inertie des articulateurs, la coarticulation anticipante serait, pour sa part le reflet d'une phase de planification motrice.

Au plan développemental, la coarticulation anticipante serait fréquemment étudiée puisqu'elle met en lumière l'existence de deux positions théoriques opposées en ce qui concerne la manière dont les enfants acquièrent la capacité à produire les segments phonémiques et à les relier entre eux pour communiquer.

Pour les défenseurs de la première perspective tels que Kent (1983), Katz, Kripke, & Tallal (1991), la coarticulation est perçue comme étant une caractéristique secondaire de la production de parole et constitue une habileté que l'enfant apprend après avoir acquis le contrôle moteur nécessaire à la production des segments individuels. Ainsi, l'enfant apprend d'abord le patron articulatoire associé à chaque phonème. Par la suite seulement, il intègre et raffine la coordination temporelle entre les segments de manière à effectuer les ajustements nécessaires pour s'adapter aux phonèmes voisins (Kent, 1983). En ce qui concerne l'amplitude de la coarticulation anticipante, les enfants présentent un degré de coarticulation intrasyllabique et intersyllabique moindre (Kent, 1983), ce qui serait le reflet que le segment représente l'unité initiale d'organisation de la parole et que le passage d'une cible à l'autre ne serait pas encore bien maîtrisé.

Dans la lignée de Davis & Mac Neilage (1990), les tenants de la seconde approche considèrent que le phonème est l'aboutissement du développement plutôt que son commencement (Menn, 1983). Pour eux, la syllabe représente l'unité initiale de la production de parole d'où le segment émerge graduellement. Dans une telle optique, les jeunes enfants qui n'ont pas encore développé le contrôle de l'indépendance segmentale des consonnes et des voyelles formant les syllabes démontrent une grande coarticulation anticipante, i.e. une importante influence acoustique de la voyelle sur la consonne précédente. Graduellement, au

cours d'une phase de différenciation, l'enfant raffine le domaine de son organisation articulatoire pour passer de la syllabe au phonème, ce qui provoque une diminution du phénomène (Nittrouer, Studdert-Kennedy, & McGowan, 1989). En d'autres mots, la syllabe, première unité de parole contrôlée par l'enfant, pourrait, au cours d'une phase de raffinement du geste articulatoire, être « décomposée » rendant ainsi possible le contrôle moteur de segments isolés (Nittrouer et al., 1989).

Les études sur la coarticulation ont généralement l'objectif de mieux comprendre la manière dont l'enfant développe le contrôle des lèvres dans la production de consonnes qui précèdent une voyelle arrondie ; des mouvements avant/arrière de langue dans les syllabes CV en fonction des caractéristiques phonétiques de la voyelle qui suit et finalement de la hauteur du velum selon le trait de nasalité du phonème à venir. Le contrôle de la coarticulation permet également de comprendre l'arrivée plus tardive de certaines classes de phonème, telles que les fricatives comparativement à celles occlusives. En effet, selon Nittrouer et ses collègues, (1989), le contrôle articulatoire nécessaire à la production de ce type de consonnes est particulièrement difficile puisque la production des constrictives nécessite une configuration très précise de la langue en l'absence de contact avec d'autres structures du tractus vocal. À l'opposé, la production de segments occlusifs, qui implique une fermeture complète en un point du conduit vocal, n'exige pas une configuration aussi complexe de la langue et procure en plus un feedback tactile clair au moment où la cible est obtenue.

Ainsi, les changements anatomiques, tout comme ceux se produisant au niveau du contrôle moteur, sont incontestablement à la base de changements importants permettant l'émergence de la parole. Ceux-ci ne suffisent toutefois pas à expliquer totalement l'évolution des vocalisations de l'enfant : les facteurs perceptifs ont eux aussi un rôle à jouer et doivent nécessairement être abordés.

1.2.4 Perception auditive

Dès la 24^{ième} semaine de gestation, l'oreille, plus exactement la cochlée, est attestée fonctionnelle chez le fœtus (Collet, 1990). Jusqu'à la 32^{ième} (Vauclair, 2004) ou la 35^{ième}

semaine (Boysson-Bardies, 1996), son niveau d'audition va poursuivre son perfectionnement. Dans le ventre maternel, le fœtus est soumis à un environnement acoustique très particulier qui lui parvient par voies intra et extra utérines. Ce fond sonore est constitué de bruits endogènes, recouvrant essentiellement les bruits biologiques maternels, placentaires et fœtaux, et de stimuli sonores exogènes comme les voix humaines. À la 26^{ème} semaine de gestation, le bébé réagirait à des stimuli auditifs (Milot et Filiatre, 1992) par des mouvements de sursaut immédiat (Lecanuet, 2000). Les stimuli langagiers, bien qu'affaiblis par le corps de la mère et le liquide amniotique atteindraient eux aussi plutôt bien l'environnement intra-utérin (Vauclair, 2004 dans Boysson-Bardies, 1996). La voix de la mère serait d'ailleurs de 5 dB plus élevée que celle des voies extérieures en raison de la simultanéité des canaux internes et externes de transmission (Lecanuet, 2000). Par ailleurs, des enregistrements réalisés *in utero*, grâce à un hydrophone placé dans l'utérus de femmes enceintes au repos, ont montré que la prosodie, de même que 30% des phonèmes étaient bien perçus par des auditeurs adultes (Querleu, Renard, Versyp, 1981). Bien que l'environnement sonore utérin ne soit pas uniforme et soit globalement peu différent de celui de la pièce dans laquelle se trouve la mère, l'utérus se révèle un milieu assez bruyant : son niveau atteindrait les 75 dB (Vauclair, 2000). Cependant, il laisserait passer suffisamment d'information pour rendre envisageable une intégration prénatale de certains paramètres de la parole.

Par le biais de l'observation des modulations de la fréquence cardiaque, Lecanuet et ses collègues (1997, 1993 a et b) ont montré que des modifications de la structure des sons présentés provoquaient un relâchement significatif du rythme cardiaque ce qui témoigne de la présence d'une discrimination chez le fœtus. Ils concluent que très tôt l'être humain est sensible au monde sonore qui l'entoure et y réagit.

De telles expérimentations illustrent assez bien les facultés du fœtus. Mais la question à savoir dans quelle mesure le nouveau-né conserve-t-il la trace de cette imprégnation prénatale a été étudiée par Decasper et Spencer (1986 cité dans Vauclair 2004) par le biais de la succion non-nutritive. Ils ont demandé à des mères de lire deux fois par jour à voix haute une berceuse, au cours des 12 dernières semaines de leur grossesse. Les auteurs ont montré que tous les nourrissons augmentaient leur rythme de succion lorsqu'ils entendaient la berceuse

mais pas lorsqu'une histoire nouvelle leur était présentée. En somme, il semble que dès sa vie fœtale, l'être humain est sensible à l'univers langagier. Le stade fœtal apparaît donc comme une étape préparatoire pour les développements perceptuels à venir.

À la naissance, le nourrisson ne parle pas mais présenterait un système perceptuel doté d'une sensibilité particulière pour le langage et pour les propriétés acoustiques de la parole (Jusczyk, 1985 ; Kuhl & Meltzoff, 1996 ; Polka & Werker, 1994). Les expériences menées par Mehler, Jusczyk, Lambertz, Halsted et collaborateurs (1988) ont entre autre démontré, à l'aide de mesures de succion, que le nourrisson préfère la voix de sa mère à une autre, qu'il préfère également les sons de sa langue maternelle à une langue étrangère et qu'il est particulièrement sensible au langage qui lui est adressé (*motherese*). De nombreuses recherches (e.g. Bertoncini, Bijeljac-Babic, Jusczyk, Kennedy & Mehler, 1988 ; Eimas, Siqueland, Jusczyk, Vigorito, 1971) rapportent également une perception catégorielle précoce pour les contrastes de traits distinctifs (e.g. voisé/sourd).

Les contrastes segmentaux semblent particulièrement bien perçus à la naissance. Pourtant, il semblerait que l'unité perceptive de base soit la syllabe. Jusczyk et Derrah (1987) ont montré que les jeunes enfants de 7 mois n'étaient pas en mesure d'extraire la consonne initiale de syllabes variant uniquement au plan vocalique. D'autres travaux (Bertoncini et al., 1988) avec des nourrissons âgés de 2 mois, ont montré que ceux-ci n'étaient pas capables d'extraire ni les segments vocaliques ou consonantiques des syllabes présentées.

Dès le premier mois de vie, l'enfant est capable de percevoir les contrastes phonémiques de diverses langues (Anderson, Morgan, White, 2003). Selon Kuhl, (1995, 1992), l'exposition aux phonèmes d'un environnement linguistique spécifique structurerait l'espace phonétique autour de prototypes impliquant la réorganisation de la perception : c'est ce qu'elle a appelé l'« effet aimant » (*magnet effect*). Kuhl (1992) fixe la restructuration de l'espace vocalique à 6 mois. Ce processus permettrait alors à l'enfant de construire des représentations de voyelle de la langue maternelle. En revanche pour focaliser sur les contrastes de son environnement linguistique, il perdrait peu à peu la capacité à discriminer les contrastes phonémique étrangers. Durant cette même période, l'enfant devient également

sensible aux règles phonotactiques qui régissent les structures syllabiques de sa langue (par exemple : l'enchaînement /pq/ n'existe pas en français). La réorganisation de l'espace perceptif des consonnes est plus tardive et souvent corrélée à la naissance de la reconnaissance des éléments du lexique (Boysson-Bardies, 1996). On observe un déclin de la discrimination consonantique vers l'âge de 10 mois (Werker & Tees, 1984).

Pour maîtriser une langue il faut construire un vocabulaire et un système de règles de génération de mots et phrases. Les deux tâches ne sont pas simples, notamment parce que la langue parlée (à différence de la langue écrite) ne contient pas des signaux physiques qui marquent où un mot se termine et où un autre commence. Comment les enfants font-ils pour développer assez vite leurs connaissances lexicales et grammaticales reste un mystère. Un mécanisme récemment avancé est celui de l'apprentissage statistique (Saffran, Aslin & Newport, 1996) qui postule que les enfants et les adultes possèdent des capacités à faire des calculs statistiques complexes qui pourraient les aider à trouver les mots dans un signal continu de parole. Il semble que les bébés seraient extrêmement sensibles à la régularité statistique présente dans les séquences de paroles qu'ils entendent. Ainsi, ils exploiteraient le fait que les probabilités transitionnelles entre syllabes successives sont plus élevées à l'intérieur des mots qu'entre mots. L'impact sur la littérature de cette découverte a été très important, au point que plusieurs chercheurs ont pensé que les capacités statistiques pourraient suffire à expliquer l'apprentissage de plusieurs autres aspects de la langue dont les mots (Graf, Estes, Evans, Alibali, & Evans, 2007) et la grammaire (Mintz, 2003).

Ainsi, les capacités perceptives évoluent donc considérablement chez le nourrisson au cours de sa première année de vie. Un tel développement aurait comme objectif de permettre à l'enfant de se représenter le système phonologique de sa langue maternelle et d'enregistrer des prototypes similaires à ceux de l'adulte. Ces représentations perceptives jouent un rôle dans la production en servant de guide au contrôle moteur, c'est-à-dire, qu'ils servent de cibles que l'enfant vise au cours de son apprentissage vocal.

1.2.5 Imitation

L'imitation représente un outil d'apprentissage puissant utilisé tout au cours de l'existence. Pour les espèces sociales, l'expérience d'un autre, par le biais d'observation indirecte ou d'enseignement formel, s'avère un potentiel de connaissances considérables. Observer et copier l'action d'un individu qui a préalablement trouvé le moyen de résoudre un nouveau problème s'avère également une solution hautement économique à comparée à une stratégie d'essais et erreurs. Bien que l'imitation puisse être utile à tous âges, elle possède probablement une utilité encore plus grande au cours des premières années de vie du jeune enfant. Des travaux de Meltzoff, montrent que dès la naissance (les premières données datent de quelques heures), le nourrisson répond de manière spécifique à des grimaces produites par un expérimentateur, donc qu'il est capable de produire une action de la langue, de la mâchoire ou des lèvres, adaptées à l'information visuelle qui lui est fournie (Meltzoff & Moore, 1977). Barr et Hayne (1996) ont d'ailleurs montré qu'entre l'âge de 12 et 18 mois, les nourrissons apprennent quotidiennement un ou deux nouveaux comportements en observant uniquement leur environnement.

Lorsqu'appliqué au langage, cette prédisposition, associée aux capacités phonologiques, favorise le développement de la parole (Locke & Pearson, 1992). En effet, en écoutant le langage de son environnement et en tentant de reproduire les sons qu'il vient d'entendre, l'enfant serait en mesure d'acquérir l'inventaire des sons ainsi que les caractéristiques prosodiques de sa langue maternelle. C'est d'ailleurs par le biais du processus d'imitation que l'enfant parviendrait à acquérir la sonorité ou « l'accent » de sa langue maternelle.

Kuhl & Meltzoff (1996) ont permis de clarifier les processus par lesquels l'imitation guide le développement vocal. Selon ces auteurs, au fur et à mesure que le nourrisson est exposé à la « parole mature » de son environnement linguistique, il emmagasine les représentations acoustiques de ces productions qui lui servent par la suite de « cibles » à atteindre dans ses propres productions. Par le biais des premières vocalisations, l'enfant formerait des liens sensori-moteurs associant le résultat auditif de ses productions à la séquence motrice utilisée pour les produire. Graduellement, par approximations et

comparaisons entre ses productions et les cibles stockées en mémoire, l'enfant s'auto-corrigerait pour réussir éventuellement à produire des sons similaires à ses modèles internalisés et conformes aux sons de sa langue maternelle.

Les données précédentes confirment, au plan comportemental, l'émergence graduelle de liens sensori-moteurs influençant le développement de la parole. La découverte des neurones miroirs dans le cerveau des singes macaques (Gallese, Fadiga, Fogassi, Rizzolatti, 1996 ; Rizzolatti, Fadiga, Gallese, Fogassi, 1996) a su fournir un substrat neurologique pour rendre compte de cette association. Cette classe de neurones, localisée dans les aires pré-motrices déchargent non seulement quand le singe exécute des actions de la main tendant vers un but, comme attraper des objets, mais aussi quand il observe d'autres individus (singes ou humains) exécutant des actions similaires.

Plusieurs études utilisant différentes techniques et méthodes expérimentales ont aussi montré l'existence dans le cerveau humain d'un système de neurones miroir qui appariant la perception et l'exécution de l'action. Durant l'observation de l'action il y a une forte activation des aires pré-motrices et pariétales, probablement l'équivalent humain des aires dans lesquelles les neurones miroir ont été originellement décrits chez le singe (pour un compte-rendu, voir Rizzolatti, Fogassi, Gallese, 2001; Gallese 2003 ; Rizzolatti et Craighero 2004 ; Gallese, Keysers, Rizzolatti, 2004). Bien plus, le système de mise en d'appariement des neurones miroir concernant les actions chez les humains est organisé somatotopiquement - des régions corticales différentes à l'intérieur des cortex pariétaux pré-moteurs et postérieurs étant activées par l'observation/ exécution d'actions relatives à la bouche, à la main, au pied (Buccino, Binkofski, Fink, Fadiga, Fogassi, Gallese, Seitz, Zilles, Rizzolatti, Freund (2001).

Une récente étude d'imagerie cérébrale, dans laquelle des participants humains observaient des actions de communication de la bouche exécutées par des humains, des singes et des chiens ont montré que cette observation provoquait une activation de foyers corticaux différents selon les différentes espèces observées. L'observation d'un discours humain silencieux activait la partie operculaire du gyrus frontal inférieur gauche, un secteur

de la région de Broca. L'observation du claquement de lèvres du singe activait bilatéralement une partie plus petite de la même région. Enfin, l'observation de l'abolement du chien activait seulement les aires visuelles extra striées. Les actions appartenant au répertoire moteur de l'observateur (comme mordre et lire un discours) ou s'y rapportant de très près (le claquement de lèvres du singe) sont répertoriées dans le système moteur de l'observateur. Les actions qui n'appartiennent pas à ce répertoire (comme l'abolement) sont répertoriées et catégorisées dorénavant sur la base de leurs propriétés visuelles (Buccino, Lui, Canseca, Patteri, Lagravinese, Benuzzi, Porro, Rizzolatti, 2004).

L'implication du système moteur durant l'observation des actions de communication de la bouche est aussi attestée par les résultats d'une étude TMS (stimulation magnétique transcrâniale) par Watkins, Strafella et Paus (2003), dans laquelle ils ont montré que l'observation d'actions de la bouche se rapportant à la communication ou au discours facilite l'excitabilité du système moteur impliqué dans la production des mêmes actions

En résumé, l'imitation implique que l'enfant soit en mesure d'entendre les sons produits par les autres (*extéroception* auditive) mais également qu'il soit capable de percevoir le résultat de ses propres tentatives de parole (*proprioception* auditive) (Locke, 1983). Le feedback auditif, c'est-à-dire le retour auditif des propres mouvements articulatoires, a donc une influence non-négligeable.

1.2.6 Feedback auditif

Tel que mentionné dans les sections précédentes, l'appareil bucco-phonatoire de l'enfant subit, tout au long du développement, un nombre important de modifications tant au niveau de sa forme, de sa taille, que de son innervation motrice et de ses aspects fonctionnels. Cette restructuration complète a entre autre la conséquence d'obliger l'enfant à s'adapter à ces modifications en apprenant à utiliser différentes configurations articulatoires afin de réaliser un même objectif de parole (Bernstein, 1967). Ainsi, tout au cours du développement, le feedback auditif agirait pour l'enfant comme une « information contrôle » lui permettant de corriger et d'adapter ses productions malgré les nombreux changements morphologiques que subit son appareil vocal (Guenther, Hampson, & Johnson, 1998).

Une autre fonction du feedback auditif est celle de permettre d'acquérir un modèle interne des relations sensori-motrices nécessaire à la production de cibles fonctionnelles. Selon Kuhl & Meltzoff (1988), le retour auditif de ses propres mouvements articulatoires permet à l'enfant de fermer la boucle perceptuo-motrice en lui fournissant l'information nécessaire à l'auto-correction.

Ainsi, l'enfant est exposé en permanence à deux sources d'informations sonores : celles provenant de son entourage et celles résultant de ses propres productions. Toutefois, ce que le jeune enfant entend est également accessible visuellement. Les études sur l'imitation mettent en évidence la multimodalité des stimuli et le possible rôle de la vision dans le développement de la parole.

1.2.7 Perception visuelle

Chez l'adulte, il a été démontré que les indices visuels de la parole sont utilisés afin de décoder une cible phonologique (Erber, 1975). Outre le rôle de la vision dans des situations où le signal est dégradé par du bruit (Ewersten & Birk-Nielson, 1971), le célèbre effet McGurk démontre bien que l'information visuelle influence la perception auditive (McGurk et McDonald, 1976).

Il semble que regarder la bouche d'un locuteur fournit des informations prosodiques à propos du rythme et du timing de même que des indices phonétiques concernant le lieu articulatoire des consonnes (Kuhl & Meltzoff, 1984) et l'arrondissement des voyelles (Robert-Ribes, 1995). Toutefois, les autres traits phonétiques, tels que la nasalité, la mode articulatoire, la hauteur, l'aperture et le voisement ne se distinguent peu ou pas visuellement. Ces résultats suggèrent que la vision a un rôle à jouer dans la perception de la parole mais que celle-ci doit être couplée à l'audition pour traiter de manière optimale l'information linguistique. Les études sur l'influence respective de la vision et de l'audition pour la perception de la parole sont à la base de théories multimodales selon lesquelles les informations sur la parole sont captées par les modalités auditives et visuelles pour être intégrées en un percept phonétique unifié (Kuhl & Meltzoff, 1984). Malgré que les

mécanismes permettant une telle intégration ne soient pas encore bien compris, on peut supposer une interaction continue entre ces deux modalités.

En ce qui concerne les enfants, des travaux ont montré qu'à la naissance, les nourrissons sont capables d'imiter trois gestes à partir de leur vision : la protrusion de la langue, celle des lèvres et l'abaissement de la mandibule (Meltzoff, 1988). Ces mouvements, recrutés dans la parole adulte, ne sont pas liés au développement mais n'en sont pas moins disponibles avant les premières vocalisations. Dès 5 mois, on observe une sensibilité à l'effet McGurk, bien que le phénomène serait moins prononcé (Rosenblum, Shmuckler, Johnson, 1997 ; Massaro, 1984). Un tel résultat suggère que l'expérience avec la parole améliorerait les capacités à décoder les indices visuels.

Cette perception multimodale de la parole a également des effets sur la production de parole des enfants. Une étude de Leggerstee (1990) a démontré que les nourrissons vocalisent davantage lorsque le son et les lèvres présentent une correspondance et qu'un conflit entre le signal auditif et visuel limite leur capacité de production. L'auteur conclut donc que les jeunes enfants sont capables de faire l'appariement audio-visuel et qu'ils prennent en compte les deux informations (visuelle et auditive) dans leurs vocalisations. En utilisant une tête parlante virtuelle simulant le développement de la parole, Schwartz et ses collègues ont montré que l'information visuelle n'était pas suffisante pour rendre compte de la présence d'imitation chez le jeune enfant de moins de 5 mois et donc que l'information auditive disponible était nécessaire pour guider les nourrissons vers la vocalisation choisie.

Enfin, Locke & Pearson (1992) évoquent également l'importance de la vision dans l'imitation. Selon eux, les enfants récupèreraient des informations visibles et/ou audibles selon leur statut dans l'acte langagier (observateurs ou participants). L'observation de l'activité de parole permettrait aux enfants l'apprentissage de l'association entre les mouvements visibles des lèvres et les prototypes sonores. Les propres productions des enfants, quant à elles, leur permettraient d'entendre des mouvements audibles et donc d'apprendre l'association entre les sons et l'articulation correspondante.

En résumé, il semble que les productions des enfants soient guidées par l'information auditive mais aussi visuelle. Les enfants exploitent ainsi toutes les modalités sensorielles afin d'intégrer dans leur langage, le plus grand nombre d'informations recueillies. La nature multimodale des sons de la parole n'est pas seulement signifiante pour la perception de la parole mais elle l'est également pour sa production. Pourtant, si ce caractère multimodal est reconnu, le rôle de chacune des modalités dans l'acquisition du langage est loin d'être bien compris. Par exemple, malgré le rôle important de la vision, les productions limitées et atypiques des enfants souffrant de surdité en bas âge permettent de croire que cette modalité n'est pas suffisante pour soutenir efficacement le développement de la parole. Pour des raisons d'attention, de dominance auditive ou de capacités visuelles moins développées, les enfants semblent attribuer davantage d'importance à l'information acoustique pour les guider dans cette tâche.

1.2.8 Période critique et exposition à la parole

Les facteurs présentés précédemment sont tous essentiels au développement de la parole. Mais l'émergence de la communication orale exige également la participation du système nerveux central. Tout au long du développement, le système nerveux subit les influences du milieu environnant. Une telle plasticité permet l'acquisition et la maîtrise de nouvelles habiletés, telles que la parole, mais également une meilleure adaptation de l'organisme à son milieu. Il appert toutefois que cette plasticité ne serait pas uniforme dans le temps et que chaque fonction et région cérébrale posséderait sa propre période de plasticité optimale.

Selon la théorie de la période critique, il existe, durant le développement, une période prédéterminée biologiquement durant laquelle le système nerveux d'un organisme est ouvert aux influences de l'extérieur. Avant et après ce « point critique », le système ne pourrait plus être modifié par l'expérience. Les périodes critiques auraient l'avantage de permettre aux organismes de répondre de manière optimale aux exigences de l'environnement dans lequel ils évoluent. D'un autre côté, elles constitueraient des périodes de grande vulnérabilité durant lesquelles une privation ou au contraire la présence de stimulations atypiques seraient susceptibles d'avoir des conséquences permanentes sur le système en développement.

Plusieurs décennies de recherches semblent confirmer que certains systèmes ou fonctions répondent à une période critique. Par exemple, Hubel et Wiesel (1970) empêche un singe d'utiliser l'un de ses yeux durant les 6 premiers mois de sa vie en lui suturant la paupière. Lorsque celle-ci est détachée, l'animal a pratiquement perdu toute vision utile par cet œil et ce de manière irréversible. Par ailleurs, des enregistrements électrophysiologiques au niveau des cellules ganglionnaires de la rétine et au niveau des cellules du corps genouillé latéral correspondant à cet œil indiquent que ces cellules ont des champs visuels normaux et fonctionnels. Mais ce sont plutôt les cellules du cortex visuel primaire correspondant à l'œil ayant subi la privation sensorielle qui ne sont pratiquement plus activées par cet œil. Les auteurs concluent donc en la présence d'une période critique pour la maturation et le maintien des connections entre les structures du système visuel et le cortex strié. Le phénomène de l'empreinte chez les oiseaux est un autre exemple de période critique. Lorenz (1970), rapporte que, juste après la naissance, les oisillons s'attachent rapidement au premier objet qui bouge devant eux, la plupart du temps leur mère. Mais si celle-ci est absente, cet attachement peut se transférer à tout objet en mouvement de taille suffisante, comme ce fut le cas pour les bottes de caoutchouc du chercheur! Les oisillons suivent alors cet objet en mouvement comme s'il s'agissait de leur mère. L'empreinte s'acquiert donc très rapidement et, une fois acquise, ne disparaît généralement plus. Elle ne peut se former que durant une période limitée dans le temps (pas plus que deux jours après l'éclosion des œufs dans ce cas-ci) et constitue une phase déterminante de l'attachement social.

Cette théorie trouve également des appuis dans les recherches sur le langage. Dans les années 1950, Penfield et Roberts (1959) postulent l'existence d'un calendrier biologique pour l'apprentissage du langage basé sur leur exploration de cerveau humain. Ils rapportent que, dans certains cas de blessure, le cerveau humain d'individus plus jeunes que neuf ans guérit en général complètement. L'idée que l'acquisition du langage est un phénomène prisonnier de fortes contraintes temporelles a également été avancée par Lenneberg (1967). En constatant les retards langagiers d'enfants sourds, les difficultés d'adultes qui tentent d'apprendre une seconde langue et en interprétant les observations cliniques d'un neurologue, Bassar (1962), avec des cérébrolésés, il soutient que l'acquisition du langage correspond à un

certain stade de développement qui est rapidement dépassé à l'âge de la puberté. Son argument se centre sur la conviction que le cerveau de l'enfant n'est pas encore latéralisé et que les deux hémisphères sont équipotents, c'est-à-dire équivalents pour la spécialisation hémisphérique des fonctions cognitives.

Les conclusions de Lenneberg ont eu beaucoup d'influence. Cependant, sa synthèse pose divers problèmes. En effet, les faits qu'il relate sont souvent anecdotiques et susceptibles d'autres interprétations (voir Singleton, 1989). Les données sont généralement incomplètes et plusieurs termes sont utilisées de manière inconsistante et différemment selon le cas qu'il rapporte (Singleton, 2007). De plus, de nombreux travaux dans des domaines divers (clinique, anatomie, cyto-architectonie, électrophysiologie et imagerie anatomique et fonctionnelle) tendent maintenant à converger vers l'existence d'une asymétrie structurelle et fonctionnelle du cerveau dès l'âge néo-natal, et même dès la vie fœtale (Hertz-Pannier, Chiron, Lambertz, 2003) et que la latéralisation n'explique pas la compétence des jeunes enfants pour l'acquisition du langage (Mayberry, 1994).

Malgré les inconsistances précédentes, plusieurs domaines de recherche se sont néanmoins intéressés à la question de la période critique pour le développement du langage. Tout d'abord, on trouve les diverses études de cas effectuées auprès d'individus qui ont été isolés socialement durant leur enfance. Parmi celles-ci nous pouvons citer celle de Victor de l'Aveyron, un garçon retrouvé nu en France en 1799. Capturé lorsqu'il avait 11 ans, on croit qu'il avait vécu en liberté pendant au moins six ans. Quand le garçon est trouvé, il ne fait rien pour essayer de communiquer. Le garçon est confié au Dr. Jean Itard qui tentera, en vain, durant plus de 5 ans à lui apprendre à parler.

Un autre cas est celui de Genie, une adolescente de 13 ans qui aurait vécu pendant plus d'une décennie, complètement cloîtrée, seule dans une pièce, sans aucune forme d'échange, de quelque sorte que ce soit, avec un humain. Lors de sa découverte, elle ne pouvait parler ni se tenir debout droite. Au cours des mois qui ont suivi, elle a commencé à parler et à construire des phrases simples. Cependant, malgré des années dans des programmes de réhabilitation intensifs (Curtis, 1977 ; Rymer, 1992) la grammaire et la

syntaxe sont demeurées significativement retardées comparativement à l'expansion de son vocabulaire. Même si Genie désirait avoir des contacts avec les autres, elle en était incapable par le biais du langage.

Ces études d'enfants sauvages semblent confirmer la présence de la période critique. Toutefois, une telle interprétation doit être effectuée avec prudence. En effet, les informations concernant la réelle durée d'exposition au langage avant l'intégration de même que sur la gravité des traumatismes affectifs sont extrêmement lacunaires. Il est également possible que les sévices dont ils ont été victimes aient été la cause de certaines perturbations cognitives et affectives ayant affecté leur réelle capacité à développer le langage (Lundy, 1999 ; Peterson & Siegal, 1995), ce qui n'aurait alors rien à voir avec la période critique. Enfin, certaines données suggèrent que ces Victor de l'Aveyron présentait déjà durant sa petite enfance, et donc avant même la privation, certaines conditions cognitives limitant ses possibilités (Krashen, 1973).

Les recherches effectuées auprès d'enfants ayant subi des lésions cérébrales unilatérales dans une zone langagière constituent un autre domaine de recherche d'intérêt pour l'étude de la période critique. Par exemple, Hertz-Pannier, Chiron, Jambaqué, Renaux-Kieffer, Van de Moortele, Delalande et al. (2002), rapportent le cas d'un jeune garçon ayant débuté une encéphalite de Rasmussen de l'hémisphère gauche à l'âge de 5 ans et demi, après avoir acquis un langage normal. Un premier test d'imagerie montre une latéralisation gauche des réseaux du langage. En raison de l'aggravation de l'épilepsie, une déconnection complète de l'hémisphère dominant est pratiquée vers l'âge de 9 ans, au décours de laquelle le patient est devenu aphasique et alexique. Un an et demi après l'intervention, l'enfant a récupéré un langage parfaitement compréhensible, avec toutefois la persistance d'un déficit morpho-syntaxique. Une seconde évaluation en imagerie a montré une « transfert » des réseaux du langage dans des régions droites homologues de celles constatées à gauche avant la chirurgie. Stark, Lbeile, Brandt, Freeman et Vining (1995) rapportent les résultats d'un suivi longitudinal effectué chez une dizaine d'enfants ayant subi une hémisphérectomie gauche ou droite. Chez les cérébrolésés gauche, des déficits de compréhension syntaxiques et de différenciation phonémique perdurent, alors que les performances demeurent normales pour

les patients opérés du côté droit. Aucun déficit du langage articulé n'apparaît pour les deux groupes.

De tels résultats suggèrent que si la lésion survient tôt dans l'enfance, les jeunes récupéreront le langage. Plus tard, une récupération complète serait sérieusement compromise et des déficits à long terme de certains aspects dont la syntaxe seraient observés (de Boysson-Bardies, 1999). De plus, il semble que l'hémisphère droit soit en mesure de mieux prendre en charge le contrôle du discours que celui de la syntaxe ou du traitement sonore. En revanche, Telfeian, Berqvist, Danielak, Simon, et Duhaime (2002) rapporte les performances d'une adolescente ayant subi une hémisphérectomie du lobe gauche à l'âge de 16 ans. Les auteurs montrent une récupération du langage remarquable remettant ainsi en question les limites de l'âge pour la récupération d'un langage fonctionnel. Néanmoins, Hertz-Pannier et al., 2003 rappellent que de nombreux facteurs sont susceptibles d'influencer la plasticité cérébrale et donc les résultats des études de lésions cérébrales : l'âge au moment de la blessure, la taille, la localisation, le caractère focal ou diffus, l'association à une épilepsie, la prise de médicaments. De plus, rares sont les travaux qui sont aptes à contrôler l'ensemble de ces variables. Ils soulignent enfin que les nombreuses différences entre les études rendent les comparaisons et conclusions sur les pronostics fonctionnels difficiles à généraliser.

Un dernier exemple provient d'études réalisées auprès d'enfants sourds peu exposés au langage oral ou signé. Ces recherches montrent que les premières années sont les plus sensibles pour l'acquisition de la langue (Mayberry, 1993 a). Ainsi, s'il y a surdité durant les 12 premiers mois de vie, des déficits phonémiques persisteront 8 ans plus tard (Moody, Schwartz, Gravel, Wallace, Ellis, Lee, 1996). De plus, les enfants sourds dont la première exposition au langage signé survient après l'âge de 6 ans, montrent des troubles d'apprentissage du langage (Mayberry & Locke, 2003). Ils ont de la difficulté à décoder la forme des signes, à accéder rapidement au lexique et à la signification des signes et finalement prennent davantage de temps pour identifier les caractéristiques phonologiques et morphologiques des signes. Ces enfants demeurent toutefois meilleurs aux plans

morphologiques et syntaxiques que ceux exposés au langage signé après 12 ans (Newport, 1990).

L'établissement d'une période critique fixe et rigide implique nécessairement de clarifier les mécanismes qui la sous-tendent. La justification de Lenneberg faisant intervenir la latéralisation ne représente qu'une des multiples théories tentant de rendre compte de la circuiterie neurologique à la base de cette période optimale. Penfield et Roberts (1959) mettent en cause une diminution de la plasticité cérébrale. Selon les auteurs, le cerveau humain devient progressivement rigide et raide après l'âge de neuf ans. Avant cet âge, la grande plasticité du cerveau rend l'enfant particulièrement performant pour l'apprentissage de la parole. Seliger (1978) implique certaines fonctions secondaires de l'hémisphère gauche qui participe au traitement du langage, alors que Diller (1981) évoque le calendrier de maturation des divers types de cellules cérébrales. Pulvermüller et Schuman (1994) offre une perspective faisant intervenir la myélinisation. Pour les auteurs, ce processus réduirait la plasticité dans les régions du langage. Or puisque la myélinisation a pour objectif d'améliorer l'efficacité de la communication neuronale, il semble difficile de comprendre pourquoi elle empêcherait l'acquisition du langage. Des recherches en imagerie mettent en cause des différences dans la représentation spatiale du langage. Les apprenants précoces présentaient une distribution nerveuse plus localisée que les apprenants plus tardifs dont les zones activées étaient plus distribuées et moins spécifiques (Wattendorf, Westermann, Zappatore, Franceschini, Lüdi, et al., 2001). Toutefois, là encore des données ultérieures remettent en question les résultats précédents. En effet, Frederici, Steinhauer et Pfeifer (2002) rapportent que les adultes apprenant une langue artificielle ne montraient aucune différence dans les zones de langage impliquées.

En somme, il ne semble exister aucun consensus en ce qui concerne l'explication neurologique pour une seule et unique période critique pour le langage. Telle que l'avance Marinova-Todd, Marshall et Snow (2000), la nature exacte des connexions entre le fonctionnement du cerveau et le comportement langagier seront sans aucun doute confirmées avec le temps mais ne peut être déduite des données actuellement disponibles. De plus, on en sait encore bien peu quant à la durée et la fin d'une telle période critique pour le langage.

C'est la raison pour laquelle de plus en plus de chercheurs (e.g. Sharma, Dorman, Kral, 2005 ; Michel & Moore, 1995 ; Bateson, 1979) préfèrent l'appellation périodes sensibles, termes plus conservateurs, qui représenteraient mieux la réalité du développement, où les premières années constituent certes un moment idéal, mais non le seul durant lequel une fonction (comme par exemple le langage parlé) peut être acquise (Oyama, 1979). À la lumière des données, si un aspect du langage apparaît critique, ce n'est pas tant l'âge limite où un développement des capacités n'est plus possible mais plutôt celui où l'input linguistique doit être fourni à l'enfant pour lui permettre de construire ses apprentissages subséquents.

Les enfants sourds prélinguaux qui reçoivent un IC, de par leur expérience sensorielle unique, constituent l'expérience naturelle pour étudier dans quelle mesure le développement de la parole est possible à la suite d'une privation auditive suivie d'une restauration sensorielle. Dans les prochaines sections on présente brièvement les impacts négatifs de la surdité sur le développement de la parole, ainsi que sur les performances observées à la suite de l'implantation cochléaire.

1.3 Surdité, parole et implant cochléaire

1.3.1 Fonctionnement de l'implant cochléaire

Préalablement à une description de l'anatomie de l'oreille et de son fonctionnement, nous situons, sur la figure 8, les principales structures dont il sera question au cours des prochains paragraphes.

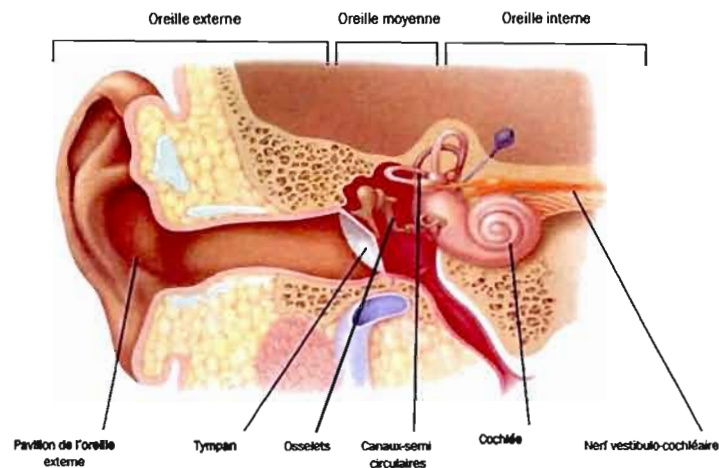


Figure 8 Schéma des principales structures de l'oreille

Dans l'audition normale, le son se propage à travers l'oreille externe, moyenne, interne; passe par le nerf auditif et atteint finalement le cerveau tout en subissant une série de transformations. L'oreille externe saisit une onde de pression acoustique que les osselets de l'oreille moyenne convertissent en une vibration mécanique. La cochlée, une cavité de l'oreille interne en forme de colimaçon et remplie de fluide, transforme ces vibrations mécaniques en vibrations dans un liquide.

Les variations de pression dans le fluide de la cochlée permettent le déplacement d'une membrane flexible, la membrane basilaire. Ces déplacements contiennent des informations à propos de la fréquence du signal acoustique. Cette membrane est tapissée de cils qui se courbent au gré des déplacements de la membrane basilaire. Le mouvement de ces cils permet de libérer une substance provoquant la décharge des neurones. Les potentiels d'action ainsi produits signalent la présence d'une excitation à un endroit particulier de l'oreille interne. Ces neurones communiquent avec le système nerveux central et transmettent au cerveau l'information à propos du signal acoustique.

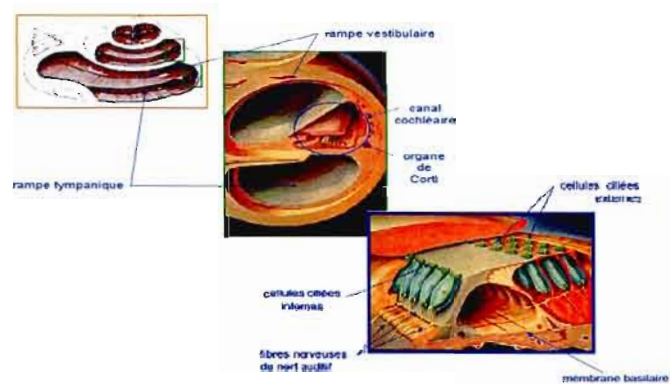


Figure 9 Anatomie de l'organe de Corti et relation avec le nerf auditif

Conjointement avec la membrane basilaire, les cellules ciliées sont responsables de transformer l'information mécanique en information neurale. Dans la plupart des surdités neurosensorielles, ces cellules ciliées qui assurent la communication entre l'oreille interne et le système nerveux ont subi une importante dégénérescence ou sont absentes. Par conséquent, il devient impossible pour le cerveau de recevoir des informations à traiter puisque qu'il n'y a plus de cellules permettant la transduction, i.e. la transformation du son en signal électrique (Figure 10).

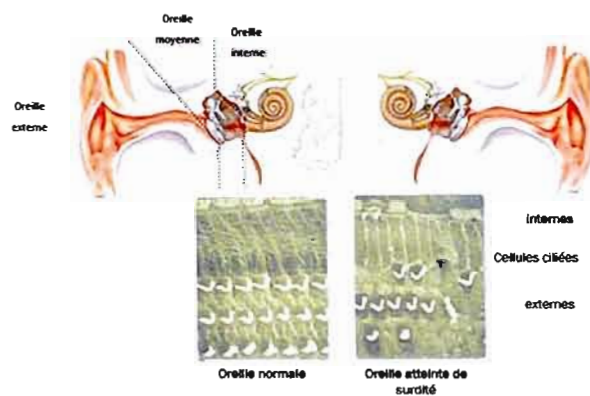


Figure 10 Illustration d'une oreille saine et d'une oreille atteinte de surdité sensorielle

L'objectif principal de l'implant cochléaire est donc de compenser les mécanismes auditifs de l'oreille interne, non-fonctionnels, en allant directement stimuler, à l'aide d'un courant électrique, les neurones du nerf auditif (voir Figure 11).

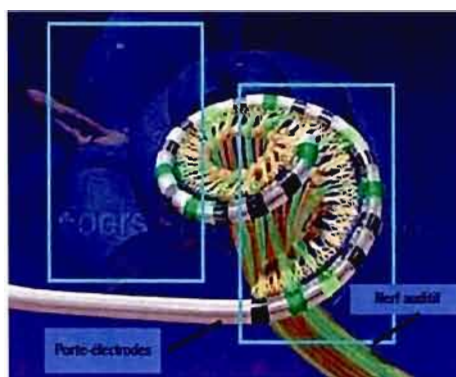


Figure 11 Électrodes stimulant les fibres du nerf auditif

L'implant cochléaire se compose de composantes externes et internes. Le microphone (porté au-dessus de l'oreille) reçoit les signaux acoustiques (la parole ou autre son), et les transforme en un signal électrique analogue qui est envoyé au processeur. Le processeur transforme le signal en un patron sonore, selon une stratégie adaptée aux besoins de l'utilisateur et envoie ce signal modifié à un transmetteur externe placé sur la peau. Ce dernier envoie ensuite le signal à un récepteur/stimulateur sous-cutané implanté directement sous le transmetteur dans l'os mastoïdien et joint à lui par le biais d'un aimant. Les électrodes reliées au récepteur/stimulateur reçoivent enfin le signal et stimulent les cellules du nerf auditif. La localisation de la stimulation sur la membrane basilaire permet de représenter la fréquence du signal sonore tandis que le nombre de fibres stimulées et la quantité de courant délivrée à chaque électrode permet de coder l'amplitude. La figure 16 présente les principales composantes de l'implant cochléaire

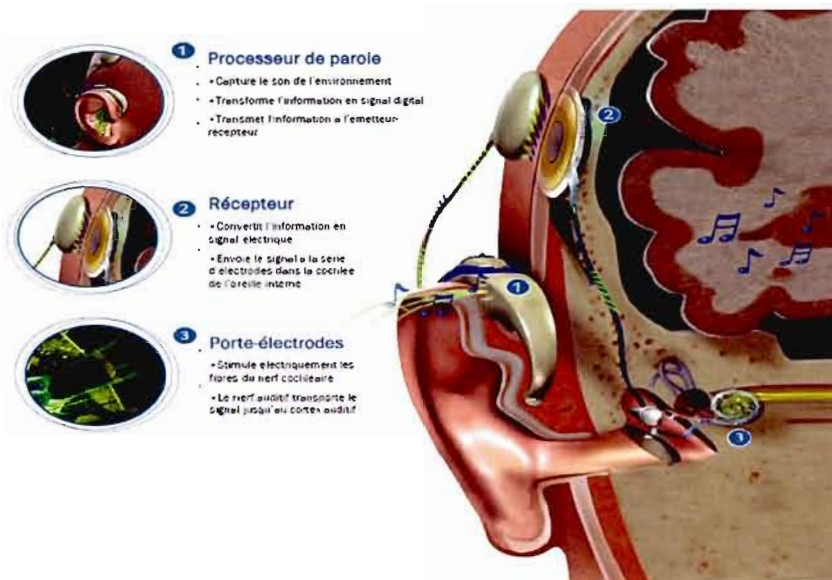


Figure 12 Principales composantes de l'implant cochléaire (reproduction et traduction du NIDCD)

Tous les implants ont été conçus de manière à prendre avantage de l'organisation tonotopique de la cochlée, qui fait en sorte que chaque région de la membrane basilaire traite spécifiquement une zone fréquentielle précise. Les implants cochléaires comprennent donc tous des séries des filtres qui fractionnent le signal en différentes bandes de fréquences. Toutefois, les implants se distinguent dans la manière dont leurs processeurs vocaux extraient, encodent et délivrent les informations sélectionnées. Un tel choix dans l'établissement des paramètres de stimulation permet d'obtenir des programmations individualisées qui s'adapteront aux besoins de chaque patient (pour une revue, voir Zeng, 2004; Truy & Lina, 2003)

1.3.2 Critères de sélection

Malgré les bénéfices apportés par la prothèse cochléaire dans les cas de surdité profonde et sévère chez l'enfant, tous les jeunes patients ne s'avèrent pas des candidats à l'implantation. Plusieurs critères guident la décision des professionnels en audiologie. L'évaluation de la candidature d'un patient repose généralement autour des trois questions suivantes (ASHA 2004): (1) La condition médicale du patient permet-elle d'effectuer une telle chirurgie? (2) L'implantation permettra-t-elle au patient d'obtenir des bénéfices

audiologiques et orthophoniques supérieurs à ce qu'il est en mesure d'atteindre avec un appareil auditif conventionnel? (3) L'environnement psychologique, familial et éducationnel de l'individu est-il suffisamment riche pour permettre une bonne intégration de l'IC dans la vie du patient?

Actuellement, l'implantation est possible dès 24 mois dans les cas de surdité bilatérale sévère à profonde (perte entre 70 et 90 dB) et à 12 mois dans les cas de surdité profonde (supérieur à 90 dB). Les principales contre-indications à la chirurgie sont une agénésie de la cochlée et des atteintes au niveau du nerf vestibulo-cochléaire.

1.3.3 Capacités perceptuelles auditives à la suite de l'implant cochléaire

En permettant une stimulation au niveau neural, l'implant cochléaire permet une meilleure perception tant au niveau de l'intensité que de la fréquence. Ceci serait susceptible de permettre aux utilisateurs de détecter la plupart des sons de la parole et d'obtenir une acuité auditive équivalant à une surdité de niveau modéré. Malgré ces améliorations, la perception demeure toujours imparfaite. En effet, malgré que la tonotopie de la cochlée soit respectée et que les stratégies de codage tendent vers une imitation de plus en plus précise des fonctions de l'oreille interne, les quelques 20 électrodes de l'implant cochléaire ne remplacent pas les 30000 cellules ciliées absentes ou défailantes (Zeng, 2004). La perception de la parole ne peut donc être faite en fonction de fréquences précises, comme le permet l'audition normale, mais plutôt en terme de pavés de reconnaissance. Au niveau audiologique, le signal de l'IC permet une amélioration auditive pour une seule oreille, l'autre demeurant gravement affectée par la surdité. La zone de fréquence couverte par l'implant cochléaire se situe entre 200 et 7500 Hz pour des seuils de perception entre 25 dB et 40 dB (Truy & Lina, 2003). Ceci est plus restreint que l'oreille normale dont les capacités s'étendent de 20 à 20000 Hz, et de 0 à 120 dB (Zeng, 2004). De plus, la perception est diminuée en présence de bruits de fond, l'audition monaurale rend la localisation des sons difficiles et une quantité importante d'informations est ignorée lorsqu'une distance de quelques mètres sépare l'individu implanté de la source sonore. La propagation du courant dans le fluide cochléaire diminue également la précision de la stimulation et cause des interférences nuisibles à la perception de la parole (Loizou 1998). Finalement, la conception

de l'implant cochléaire a pour but le traitement optimal de la parole, sans attention particulière aux autres sons. Ainsi, la perception des sons de l'environnement et de la musique s'avère de piètre qualité (Zeng, 2004).

L'adaptation à l'implant cochléaire et à la compréhension qu'il permet varie pour chaque utilisateur. De plus, pour les enfants sourds prélinguaux, la phase de familiarisation nécessite le recours à des professionnels pour les aider à donner du sens aux signaux acoustiques de manière à pouvoir les utiliser pour comprendre la parole (Bertram & Pad, 1995; Robbins, Kirk, Osberger & Ertmer, 1995).

Les études effectuées sur les habiletés de perception post-implantation démontrent que même si la réponse immédiate à la suite de l'activation de l'appareil n'est pas toujours claire, les progrès subséquents se font généralement rapidement (Notoya, Suzuki & Furukawa, 1996) et se poursuivent à divers degrés jusqu'à 24, 36 et même 48 mois après la chirurgie. Les capacités de perception des patients se développent par étapes (Waltzman, Cohen, Spivak, Ying, Brachett, Shapiro & Hoffman, 1990). Geers et Moog (1990) ont proposé une hiérarchie en cinq niveaux du développement des habiletés de perception de la parole à la suite de l'implantation. Le premier niveau ne comporte aucun patron de perception; puis (2) des patrons continus de perception; (3) une identification variable des mots; (4) une identification stable des mots et finalement (5) la reconnaissance des mots en condition libre (Miyamoto, Kirk, Robbins, Todd, & Riley, 1996). En utilisant la classification précédente, Staller, Beiter, Brimacombe, Mecklenburg & Arndt (1991) ont trouvé que le pourcentage d'enfants atteignant les catégories 3,4 et 5 (i.e. la reconnaissance en condition fermée et libre) passait de 12 à 80% à la suite de l'opération, la moitié parvenant à une reconnaissance en condition ouverte. De telles performances sont comparables à celles retrouvées chez des sujets sourds avec une perte auditive de 65 à 80 dB et qui utilisent des appareils d'amplification conventionnels. Elles sont suffisantes pour permettre le développement d'une communication orale-aurale relativement normale (Summerfield & Marshall, 1995 ; Waltzman, Fisher, Niparko, Cohen, 1995). Cette réponse accrue aux sons a des répercussions sur la vie quotidienne de ces enfants qui deviennent plus alertes aux

interactions se déroulant dans leur environnement (Mohammad, Makhdoum, Snik, van den Broek, 1997).

1.3.4 Surdité et organisation cérébrale

La surdité auditive en bas âge s'accompagne de divers processus atypiques qui nuisent au développement harmonieux du système auditif central et périphérique. Il existe une forte corrélation entre perception et production de la parole (Perkell, Guenther, Lane, Matthies, Stockmann, Tiede & Zandipour, 2004). De tels impacts sur les systèmes auditifs s'avèrent donc susceptibles de nuire à la capacité d'un individu à développer la parole.

Plusieurs études avec des modèles animaux démontrent qu'une privation auditive congénitale ou qui survient en bas âge empêche la pleine maturation du système nerveux auditif (Kral, Hartmann, Tillein, Hein, & Klinke, 2001; Ruben et Rapin, 1980; Webster & Webster, 1979). Par exemple, on retrouve moins de synapses et d'épines dendritiques au niveau des structures du cortex auditif (Perier, Alegria, & Buyse, 1984). Au niveau périphérique, malgré une cochlée complètement mature et fonctionnelle dès la 24^{ me} semaine de gestation (Manrique, Cervera-Paz, Huarte, Perez, Molina, Garcia-Tapia, 1999), il y a dégénération des cellules du ganglion spiral et des fibres du nerf vestibulocochléaire (Webster & Webster, 1979). Les patrons de projection afférentes sont altérés et l'activité métabolique des cellules nerveuses est réduite (Moore, 2002; Hartmann, Shepherd, Heid, Klinke, 1997). La myélinisation des axones de la voie auditive pré-thalamique et post-thalamique, sous la dépendance directe des stimulations acoustiques externes, est considérablement freiné (Lecours, 1982; Yakowlev & Lecours, 1967).

La réorganisation cérébrale constitue une autre conséquence de la privation auditive. Suite à des processus de compétitions et de compensations, les aires cérébrales privées d'inputs sont recrutées par d'autres régions, ce qui entraîne des représentations cérébrales atypiques. Par exemple, le cortex strié privé d'intrants visuels durant une longue période est recruté pour le traitement d'inputs tactiles et auditifs (Th oret, Merabet, & Pascual-Leone, 2004). Chez les sourds congénitaux, la stimulation visuelle évoque des réponses plus grandes sur la surface du cortex temporal, une région normalement associée au traitement auditif

(Neville, Schmidt, & Kutas, 1983). Finalement, Marcotte et Morere (1990) ont démontré que la dominance cérébrale gauche pour le langage était remplacée par une dominance droite ou une implication bilatérale pour la production de la parole chez des enfants sourds précoces, ce qui ne se retrouvait pas chez les sourds post-linguaux.

On peut alors s'interroger comment le rétablissement d'une activité afférente dans le nerf auditif peut modifier les effets de la privation auditive. La stimulation électrique exerce un rôle protecteur sur le système auditif en développement (Shepherd, Hartmann, Heid, Hardie, & Klinke, 1997). Par exemple, elle prévient partiellement chez les animaux sourds l'atrophie dans le tronc cérébral (Chouard, Meyer, Josset, & Buche, 1983). Une série d'études a montré que la stimulation électrique de l'IC permettait de renverser, du moins partiellement, les effets de la privation sur le nombre de cellules dans le ganglion spiral (Leake, Snyder, Hradek, Rebscher, 1995, 1992 : Leake, Hradek, Rebscher & Snyder, 1991; Lousteau, 1987), ainsi que dans les noyaux cochléaires ipsilatéraux à la cochlée stimulée (Lustig, Leake, Snyder, & Rebscher, 1994; Matsushima, Shepherd, Seldon, Xu, & Clark, 1991). Une réafférentation électrique favorise la reprise de l'activité neuronale dans le cortex auditif primaire chez les adultes sourds congénitaux et prélinguaux, même après une très longue période de privation sensorielle (15-20 ans) (Truy, Deiber, Cinotti, Maugiere, Froment, & Morgan, 1995). L'implant cochléaire réactive chez ces adultes les mécanismes cérébraux sous-jacents à la compréhension de la parole et le métabolisme redevient presque normal dans le cortex auditif primaire et dans certaines parties du cortex associatif. Ceci suggère que les mécanismes cérébraux qui sous-tendent la perception sont modifiés à la suite d'une reprise d'afférences auditives (Ito, Iwasaki, Sakakibira, Yonekura, 1993).

Dans une étude de tomographie par émission de positons, Fujiki, Naito, Hirano, Kojima, Shiomi, Nishizawa et Honjo (2000) ont montré qu'après trois ans d'utilisation de l'implant cochléaire un des deux enfants sourds prélinguaux de l'étude présentait, en réponse à une activation par la parole, un flot sanguin cérébral accru dans les aires auditives associatives. Des études sur l'animal confirment également la présence de plasticité cérébrale à la suite de l'implantation. Quelques mois après la mise en marche des électrodes, on a remarqué, chez les chats sourds congénitaux, davantage de traitement cortical de

l'information sonore et une plus grande efficacité synaptique que chez les chats sourds non stimulés. L'activité neuronale des chats implantés ressemble à celle de chats entendants (Klinke, Kral, Heid, Tillen, Hartmann., 1999). Finalement, Ponton, Don, Eggermont, Waring, et Masuda (1996) suggèrent que le système auditif aurait la capacité de reprendre la séquence normale de développement à la suite d'une privation auditive, avec une maturation équivalente à la période de privation auditive.

Les résultats d'autres études suggèrent toutefois que la restauration sensorielle ne compense pas de façon satisfaisante les effets de la privation sur les aires auditives centrales et périphériques (Busby, Tong, Clark & 1992). Chez les enfants sourds congénitaux et prélinguaux implantés à onze ans ou après, il y a peu de changements de la propagation synaptique des voies auditives périphériques et centrales, même après deux ans de stimulation (Sharma, Dorman, & Spahr, 2002). Ponton et Eggermont (2001) ont montré que les réseaux fonctionnels dans les couches superficielles du cortex auditif ne se développent que chez les enfants implantés entre six et huit ans.

La réorganisation cérébrale est également susceptible de venir interférer avec les effets de la stimulation électrique de l'implant (Lee, Lee, Oh, Kim, Kim, Chung, Lee, Kim, 2001). On observe chez les enfants sourds prélinguaux un hypométabolisme dans les aires temporales supérieures et frontales inférieures à la suite d'une stimulation linguistique. Ceci s'expliquerait par le fait que les réseaux neuronaux qui sous-tendent d'autres systèmes sensoriels, comme le système visuel ou somatosensoriel, ont pris de l'expansion en l'absence de stimulations auditives (Rauschecker, 1995). Des études en imagerie montrent un recrutement des régions cérébrales non langagières et une contribution des régions visuelles lors de la reconnaissance des sons de la parole (Giraud, Price, Graham, & Frackowiak, 2001). Chez des individus sourds prélinguaux implantés avant huit/dix ans, on montre une activation limitée des aires auditives associatives aux sons de la parole, ce qui témoigne d'une plasticité limitée dans ces zones cérébrales (Fujiki et al., 2000). Des fonctions langagières à caractère visuel, comme l'interprétation du langage signé (Nishimura, Hashikawa, Doi, Iwaki, Watanabe, Kusuoka, Nishimura, & Kubo, 1999) ou de la lecture labiale (Calvert, Bullmore, Brammer, Campbell, Williams, McGuire, Woodruff, Iversen, David, 1997), peuvent recruter

des aires du cortex auditif. L'absence d'amélioration auditive et langagière à la suite de l'implantation suggère que des substrats neuronaux du cortex auditif puissent être relégués de façon permanente à d'autres processus cognitifs. L'étendue du recrutement intermodal dans le cortex auditif est corrélée à la durée de la surdité. Au-delà de six ans et demi, la réorganisation corticale due à la plasticité intermodale est plus difficile à renverser (Lee, Oh, Kim, Kim, Ching, Lee, Kim, 2001).

À la lumière des résultats précédents, il est clair qu'une privation auditive en bas âge entraîne divers processus de réorganisation cérébrale et de nouvelles stratégies adaptatives. La stimulation électrique induit une activation de certaines aires cérébrales qui contribuent au développement de la perception de la parole.

Tel qu'il a été vu précédemment, l'interaction de plusieurs processus et influences reliés directement (maturation, processus cognitif, etc...) ou non (perception visuelle et auditive, exposition à la parole, etc...) à l'enfant lui permet de développer normalement la parole. La surdité congénitale ou prélinguale, lorsqu'elle est bilatérale et de niveau sévère à profond, interfère donc avec la mise en place naturelle de ces divers mécanismes. Elle limite l'accès aux codes linguistiques, empêche le développement d'une perception catégorielle, limite l'accès au feedback auditif et diminue l'exposition aux exemples linguistiques de l'environnement qui permettent de spécifier les paramètres de la langue. La surdité a également un impact sur le développement du système nerveux : certaines structures s'atrophient ou n'évoluent pas. L'impact de la privation auditive se fait également sentir sur l'organisation cérébrale qui s'adapte à la privation auditive en structurant ses réseaux neuronaux de manière à privilégier le traitement des informations sensorielles les plus récurrentes, aux dépens de celles auxquelles il a été moins exposé, dont celles auditives. Nul doute que le jeune implanté présente un système modifié par l'expérience inhabituelle qu'il a dû subir. Les prochaines sections viseront donc à présenter divers travaux dont l'objectif est de clarifier la manière dont les enfants implantés développent la parole via l'accès à une perception auditive limitée, tardive et artificielle.

1.3.5 Production de parole chez les enfants sourds avant l'implantation cochléaire

Plusieurs études ont été faites sur la parole des enfants atteints de surdité. Parler nécessite la coordination de quatre systèmes : la respiration, la phonation, la résonance et l'articulation. La parole des enfants sourds est affectée au niveau de ces quatre dimensions puisque ceux-ci ne sont pas en mesure de coordonner l'activité de ces mécanismes (Bergeron & Henry, 1994). On remarque ainsi des patrons respiratoires atypiques (Hudgins & Numbers, 1942); une phonation lente, saccadée, monotone et d'une intensité insuffisante accompagnée par une résonance nasale surabondante (Ewing & Ewing, 1964). Les articulateurs ne sont pas contrôlés adéquatement et les patrons articulatoires qui sont ainsi produits représentent sans doute le comportement atypique affectant le plus l'intelligibilité. Plusieurs facteurs peuvent expliquer cet impact majeur de la surdité sur les mécanismes articulatoires.

En tout premier lieu, la privation auditive force le jeune enfant à développer son système articulatoire par l'entremise d'informations visuelles qu'il va chercher par la lecture labiale (Dodd, 1976). Malheureusement ces informations sont très limitées puisque qu'il semble que l'œil soit plus lent que l'oreille dans son intégration temporelle. De plus, même le meilleur labiolecteur ne parvient qu'à accéder à 30 à 40% du message capté sur les lèvres (Lenneberg, 1967), le rythme d'un discours ordinaire étant trop rapide et le nombre de phonèmes invisibles ou de sosies labiaux trop nombreux. La labiolecture ne permet pas non plus d'obtenir de l'information sur plusieurs traits phonémiques dont la nasalité, le voisement, le mode ou les lieux d'articulation réalisés avec la langue (Owens & Blazek, 1985). La capacité à lire sur les lèvres est également une habileté longue à maîtriser (Mogford, 1988) et les niveaux de performance atteints, grandement variables entre les individus (Erber, 1983). Pour l'enfant sourd, il semble qu'il s'écoulerait un certain temps avant qu'il n'ait recours au canal visuel comme outil de communication et de support à l'acquisition de la parole (Bishop & Mogford, 1988). À ce moment les retards de développement auraient déjà commencé. De plus, en bas âge, il n'aurait pas les capacités cognitives ni les connaissances linguistiques pour pouvoir utiliser la suppléance mentale, i.e. la capacité de reconstituer le sens d'une phrase en retrouvant les syllabes ou mots non lus sur les lèvres et non entendus via les restes auditifs, grâce à ses connaissances générales et culturelles ainsi que sa maîtrise de la langue.

Le développement articuloire des enfants sourds a également la particularité de s'effectuer sans avoir pu bénéficier pleinement des expériences pré-linguistiques formant les piliers à partir desquels émerge le développement phonologique et phonétique. Le babillage des enfants sourds comporte plusieurs anomalies : fréquence de productions réduite (McCaffrey, Davis, MacNeilage, & von Hapsburg, 1998); babillage canonique plus tardif et comportant de nombreuses structures atypiques (Oller & Eilers, 1988), un inventaire consonantique restreint (Locke, 1983; Stoel-Gammon, 1988); de nombreuses omissions consonantiques (McCaffrey et al., 1998); et un espace vocalique restreint (Kent, Osberger, Netsell, & Hustedde, 1987; McCaffrey et al., 1998; Yoshinaga-Itano, Stredler-Brown & Jancosek, 1992). Ainsi, il semble que la privation auditive affecte le babillage tant au niveau quantitatif que qualitatif.

Malgré le fait qu'ils aient un accès limité au monde linguistique oral et vocal, il importe toutefois de mentionner que les bébés sourds ne sont toutefois pas dépourvus d'habiletés pour communiquer, puisqu'il semble que ceux-ci développent un système de communication gestuel, en suivant les mêmes étapes que les enfants normo-entendants avec le langage parlé, (Petitto & Marentette, 1991; Robinshaw, 1996). Un tel développement est important puisqu'il témoigne d'une maturation cognitive s'effectuant au même rythme que leurs congénères dont l'audition n'est pas affectée.

Les recherches portant sur le développement de la parole d'enfants sourds prélinguaux rapportent généralement un nombre important d'erreurs et de phénomènes atypiques qui contribuent à rendre leur parole peu intelligible. Au niveau des voyelles, les difficultés rencontrées sont principalement reliées à la régulation de la position et de la hauteur de la langue (Nober, 1967; Smith, 1975). Cette difficulté résulte en une tendance à la neutralisation (Kent et al., 1987) ou à produire un excès de voyelles de type central (Tye-Murray & Kirk, 1993; Osberger & McGarr, 1982). Par surcroît, une plus grande proportion d'erreurs se retrouve au niveau des voyelles nécessitant une position linguale élevée ou moyenne comparativement à celles exigeant une position basse (Geffner, 1980).

Les consonnes sont elles aussi affectées par la surdité. Leur production générale est réduite et les inventaires plus restreints (Stoel-Gammon, 1988; Stoel-Gammon & Otomo, 1986). Contrairement à ce qui est observé dans les premiers mots de leurs congénères entendants, les enfants sourds produisent un excès de consonnes labiales au détriment de celles alvéolaires (Osberger & McGarr, 1982; Locke, 1983; Stoel-Gammon, 1988; Vihman, 1996). Cette tendance s'accroît à mesure qu'augmente la sévérité de la surdité (Yoshinaga-Itano et al., 1992). Des facteurs reliés à la facilité de la production, ainsi qu'à une plus grande visibilité ont été avancés pour expliquer de telles tendances (Osberger & McGarr, 1982; Stoel-Gammon & Kehoe, 1994). La surdité a également des répercussions au niveau de la précision articulatoire des trois principaux traits consonantiques que sont le mode, le lieu d'articulation ainsi que le voisement. Des problèmes à contrôler le débit de la sortie de l'air nécessaire à la constriction produisent des erreurs fréquentes au niveau des fricatives et des liquides comparativement aux nasales, occlusives et glides qui sont mieux produites (Markides, 1970). Des phénomènes de nasalisation sont également fréquents (McCaffrey et al., 1998). Pour le lieu articulatoire, les erreurs affectent surtout les consonnes produites à l'arrière de la cavité buccale, telles que les vélaire et les uvulaires (Gold, 1980; Smith, 1975). Des erreurs de voisement sont également rapportées sans qu'il n'y ait toutefois de consensus à propos du patron exact d'erreurs observées (Nober, 1967; Markides, 1970; Smith, 1975). Ainsi, les enfants sourds profonds présentent des inventaires phonémiques restreints et de nombreuses erreurs caractérisent les sons produits. Selon Tobey, Geers & Brenner (1994), la surdité affecte principalement la capacité des enfants à développer les patrons articulatoires spécifiques nécessaires à la production de chaque son et à leur distinction respective.

1.3.6 Production de la parole chez les enfants sourds à la suite de l'implantation cochléaire

1.3.6.1 Acquisition des voyelles et des consonnes

Une analyse fine des études qui se sont intéressées au développement des habiletés de production à la suite de l'implant cochléaire permet de constater que deux méthodes d'échantillonnage de la parole semblent être en mesure d'englober la plupart des travaux ayant été menés jusqu'à maintenant sur le sujet : les procédures d'imitation ou de production de mots à partir de tests normés ainsi que les échantillons de parole spontanée en situation de conversation non-structurée ou de jeu libre. La première méthode qui utilise des outils

standardisés ont généralement l'objectif d'évaluer la précision articulatoire, i.e. la qualité des phonèmes produits par l'enfant. Un des avantages de cette méthode est qu'elle ne requiert pas que le participant connaisse une quantité importante de vocabulaire ce qui simplifie sa tâche (Ling, 1980). Toutefois, les résultats obtenus par le biais de ce type de recherches doivent être interprétés avec prudence puisque des scores d'imitation élevés ne se traduisent pas toujours par des performances similaires dans la communication spontanée quotidienne (Tye-Murray & Kirk, 1993).

L'objectif principal des méthodes de production de parole spontanée est généralement de connaître les sons les plus fréquemment émis par l'enfant afin de construire des inventaires de production. Ces derniers permettent d'inférer certaines tendances à propos du développement. Le principal avantage d'une telle méthodologie est de représenter plus fidèlement les capacités de communication quotidienne en permettant d'évaluer la manière dont l'enfant intègre la parole, le langage et la prosodie (Morrisson & Shriberg, 1992). Le principal inconvénient est relié au fait que l'intention du message n'est généralement pas connue et ne peut être identifiée avec certitude particulièrement lorsque l'intelligibilité du locuteur est faible, comme c'est le cas pour une majorité d'enfants sourds qui viennent d'être implantés (Samar & Metz, 1991). Malgré tout, en raison des avantages linguistiques de ce type de procédure, un bon nombre de chercheurs y ont recours et tentent de trouver un moyen de contourner ce désavantage en incluant, dans leur devis de recherche, un moyen de différencier les productions dont la cible est connue de celles dont la cible ne l'est pas.

Une des premières études publiées à propos de la production de parole d'enfants sourds à la suite de l'implantation est celle de Kirk et Hill-Brown (1985). Les auteurs ont examiné les capacités d'imitation et de parole spontanée d'un groupe de 36 enfants qui ont reçu un implant monocanal entre 2 ans et 18 ans. Six mois après la chirurgie, les enfants ont présenté des améliorations significatives dans l'imitation des voyelles, des diphtongues et des consonnes. Toutefois aucune amélioration n'est rapportée en ce qui concerne les groupes de consonnes (*clusters*). Des résultats comparables sont obtenus 12 mois post-implantation. Des résultats comparables sont rapportés en ce qui concerne les habiletés de parole spontanée.

Tobey, Pancamo, Staller, Brimacombe, Beiter (1991b) ont investigué le développement consonantique de 29 enfants, sourds pré- et post-linguistiques, implantés entre 3,8 ans et 17,8 ans, au cours des 12 premiers mois d'expérience auditive. Les auteurs rapportent qu'à la suite de la chirurgie, un plus grand nombre d'enfants étaient en mesure de produire des consonnes. Les phonèmes avec des lieux articulatoires visibles étaient ceux les plus fréquemment produits. Or, si l'on compare les résultats de Tobey et al. (1991) avec ceux obtenus par Smith (1975) qui a observé les habiletés de parole d'enfants sourds utilisant des appareils d'amplification conventionnels, il est possible de remarquer que les productions de parole des enfants implantés sont qualitativement similaires à celles de leurs congénères porteurs d'appareils standards. De telles similarités entre les deux groupes (avec et sans implant cochléaire) permettent de s'interroger à propos des réels avantages de cette restauration sensorielle pour le développement d'une communication orale (ou du moins pour l'acquisition des consonnes). En effet, il importe de garder en tête que les enfants sourds sans implant cochléaire peuvent également montrer des améliorations dans leurs habiletés de production de parole. C'est la raison pour laquelle certaines études ont tenté d'évaluer dans quelle mesure les améliorations étaient dues à la restauration sensorielle et non aux processus reliés à la maturation normale. Pour ce faire, les auteurs ont eu recours à des groupes « contrôle » formés d'enfants porteurs d'appareils d'amplification autres que l'implant cochléaire.

Kirk, Diefendorf, Riley, et Osberger (1995) ont comparé les consonnes produites en contexte de syllabes CV (consonnes-voyelles) par des enfants implantés. Ils ont également comparé leurs résultats à ceux d'enfants sourds profonds porteurs de prothèses conventionnelles présentant divers seuils d'audition une fois appareillés. Les porteurs d'implant cochléaire ont présenté des améliorations significatives dans la production des traits de voisement, de lieu et de mode après 2 années ½ d'expérience avec l'implant cochléaire. À ce moment, leurs productions étaient généralement meilleures que celles observées pour les porteurs d'appareils auditifs ayant les surdités les plus sévères mais demeuraient néanmoins comparables à celles des porteurs d'appareils avec les seuils auditifs les plus élevés.

Dans la même lignée, Ertmer, Kirk, Sehgal, Riley et Osberger (1997) ainsi que Sehgal, Kirk, Svirsky, Ertmer et Osberger (1998) ont comparé la qualité des voyelles et des consonnes produites par deux groupes d'enfants sourds prélinguaux ayant reçu un implant cochléaire ou un appareil vibrotactile, après 18 mois d'expérience avec leur prothèse respective. Une prothèse vibrotactile est un appareil dont la fonction est d'envoyer de l'information acoustique via de petits vibrateurs sur la peau. Comparables lors de l'évaluation initiale, les enfants implantés ont obtenu des résultats supérieurs à ceux du groupe avec appareil vibrotactile et ce, tant pour les voyelles et les consonnes, suggérant que la stimulation électrique du nerf auditif permettait une meilleure perception des indices nécessaires à la reconnaissance de la parole, ce qui se ferait par la suite sentir dans la qualité des productions.

Finalement, Tobey et al. (1994) ont suivi, au cours des 36 premiers mois d'expérience auditive, l'évolution linguistique de 13 enfants sourds prélinguaux implantés, de 13 enfants porteurs d'appareils auditifs standards (AAS) et de 13 utilisateurs d'appareils vibrotactiles. Les scores obtenus à l'évaluation du 36^{ième} mois ont également été comparés à ceux d'enfants ayant des appareils auditifs standards dont les niveaux d'audition étaient situés entre 90-100dB HL (AAS+). Aucune différence n'a été observée pour les trois groupes lors de la pré-évaluation. Toutefois, les résultats obtenus lors de la dernière session d'observation ont démontré que les enfants implantés étaient ceux ayant connu les améliorations les plus importantes. Néanmoins, deux ans d'expérience leur avaient été nécessaires avant de surpasser les enfants avec appareil vibrotactile et appareils auditifs standards (AAS). Malgré tout, ces progrès n'ont toutefois pas été suffisants pour qu'ils puissent rejoindre les groupes AAS+ qui présentaient des seuils auditifs plus élevés. Les auteurs rapportent également que les améliorations à la suite de la restauration sensorielle progressaient par étapes. Une première, après 12 mois d'expérience auditive, touchant principalement les aspects suprasegmentaux (prosodiques) ; suivies des voyelles à 18 mois, des diphtongues à 24 mois et, finalement, des consonnes à 36 mois.

Des études précédentes, il ressort donc clairement que la perception auditive accessible via l'implant cochléaire permet des progrès qui surpassent ceux permis par la

maturation à elle seule. Toutefois, cette amélioration des habiletés de production exigerait du temps et ne parviendrait pas non plus à dépasser les niveaux obtenus par les enfants appareillés présentant une meilleure perception auditive. Malgré de telles améliorations, la qualité de la parole de ces enfants demeure encore loin des niveaux atteints par leurs congénères normo-entendants. Une telle observation peut sans doute trouver une partie de son explication dans les nombreuses erreurs qui s'insèrent dans leurs discours. Tye-Murray & Kirk (1993), Tye-Murray, Spencer et Woodworth (1995) ainsi que Chin (2003) se sont donc intéressés à la qualité de la parole produite par les enfants porteurs d'IC. Pour ce faire, des matrices de confusion et/ ou des descriptions des sons produits ont été incluses dans les protocoles de recherche de manière à pouvoir tirer des conclusions à propos de la précision articulatoire.

Tye-Murray & Kirk (1993) ont recueilli le discours spontané de 8 enfants sourds prélinguaux implantés entre 3 et 7,5 ans, avant leur chirurgie ainsi qu'après 6, 12, 18, 24, et 36 mois d'expérience auditive de manière à pouvoir suivre le développement de leurs voyelles et de leurs diphtongues. Leurs résultats corroborent ceux des études précédentes, qui rapportaient des améliorations phonétiques dans la production des voyelles.

En ce qui concerne les erreurs de production, les matrices effectuées ont montré que le nombre de voyelles et de diphtongues produites correctement dans chaque catégorie (antérieure, centrale et postérieure) augmentait avec le temps et débutait avec les centrales dès 12 mois post-implantation suivi des antérieures et des postérieures au cours des évaluations de 24 et 36 mois respectivement.

Tye-Murray et al. (1995) s'intéressent à la précision articulatoire des consonnes produites par un groupe de 28 enfants sourds prélinguaux ayant été implantés entre 31 et 170 mois et ce, après 36 mois d'expérience auditive. Cette étude n'étant pas de type longitudinal, il n'est donc pas possible de suivre l'évolution du développement consonantique ni d'observer les améliorations graduelles s'effectuant au plan des erreurs commises. Malgré ces limites, les matrices de confusion démontrent que les occlusives et les nasales étaient les mieux produites, pour le mode d'articulation, et les fricatives, les moins bien produites. Au

plan du lieu articulatoire, les consonnes produites avec un mouvement articulatoire visible, telles que les bilabiales et les labiodentales, avaient tendance à être produites le plus correctement et avec le moins de variabilité. Ainsi, les résultats ont permis d'observer une forte influence de la vision dans la précision articulatoire et ce même après quatre ans d'expérience auditive.

Une troisième étude portant sur l'analyse du type d'erreurs retrouvées dans les productions d'enfants implantés est celle de Chin (2003) effectuée auprès de 12 enfants implantés entre 1 et 6 ans et ayant un minimum de cinq ans d'expérience avec la prothèse cochléaire. L'intérêt de cette étude réside dans l'objectif de l'auteur qui était de faire une description complète des sons se retrouvant dans les inventaires des enfants implantés. Les résultats ont démontré que les inventaires des enfants implantés n'étaient pas seulement un sous-système du répertoire phonémique de la langue ambiante mais plutôt un ensemble unique de segments qui incluait également des consonnes ne faisant pas partie du système consonantique anglais. L'auteur suggère que le manque d'intelligibilité qui caractérise fréquemment la parole des enfants implantés pourrait sans doute trouver une partie de son explication dans la présence de tels segments n'appartenant pas au système linguistique ambiant.

Ces dernières études ont donc permis de démontrer qu'à la suite de la restauration sensorielle, l'utilisation de l'information auditive améliore la précision articulatoire des enfants implantés, en leur permettant « d'approximer » la cible qu'ils désirent produire. Malgré tout, leurs inventaires phonétiques demeurent incomplets, leur acquisition, encore principalement guidée par la vision, et leur parole continue à présenter certaines caractéristiques atypiques ou des segments ne faisant pas partie du système linguistique qu'ils tentent de maîtriser.

Le manque d'expérience avec l'implant cochléaire est fréquemment mentionné par les auteurs pour rendre compte de l'absence de certains phonèmes ou des erreurs d'articulation produites. Serry & Blamey (1999) ainsi que Blamey, Barry & Jacq (2001) ont donc tenté de contourner cette limite des études antérieures en suivant sur respectivement

quatre et six ans, le développement des voyelles et des consonnes de neuf enfants sourds prélinguaux implantés avant l'âge de cinq ans. Un second objectif était d'effectuer un suivi suffisamment long pour être en mesure d'inférer le temps dont ces enfants auraient besoin pour atteindre des niveaux de performance maximaux, i.e. où des plateaux dans les performances émergeraient, suggérant une stabilisation des progrès. Leurs résultats ont démontré que le processus d'acquisition des phonèmes de ces enfants implantés était systématique mais plus lent que ce qui est généralement attendu chez les enfants normo-entendants. En effet, après 5 ans d'expérience auditive, les courbes d'apprentissage semblaient se stabiliser et ce malgré le fait que plusieurs consonnes étaient encore absentes des répertoires. Les auteurs suggèrent que des facteurs reliés à une plasticité cérébrale décroissante pourraient expliquer de telles stabilisations dans les apprentissages.

La plupart des études décrites précédemment, qu'elles soient longitudinales ou transversales présentent toutes les résultats obtenus à partir d'analyses effectuées auprès de groupes d'enfants. Malgré que ces études soient utiles pour rapporter des tendances générales, la variabilité inter- sujets ne peut pas être abordée complètement si une description complète des inventaires obtenus n'est pas effectuée, ce qui est, en pratique, impossible à faire dans les études de groupes, en raison du temps et de la complexité de la tâche. Afin de pallier cette lacune, quelques études de cas ont été publiées afin de fournir des descriptions plus détaillées des capacités phonétiques et phonologiques pouvant être espérées à la suite d'une restauration sensorielle.

Ertmer (2001) et Ertmer et Mellon (2001) rapportent respectivement l'évolution des voyelles et des consonnes observées dans la parole spontanée d'un enfant implanté à 19 mois et suivi durant les 12 premiers mois de son expérience auditive. Des améliorations sont observées tant pour les voyelles que pour les consonnes, ce qui suggère que cet enfant apprenait graduellement à utiliser l'information auditive pour construire son répertoire phonétique

Chin et Pisoni (2000) publient la description du système phonologique en émergence d'un enfant sourds prélinguaux, deux ans après son implantation. Leurs résultats indiquent

que malgré la présence de segments vocaliques et consonantiques, le système phonologique de cet enfant demeurerait encore inférieur à celui pouvant être attendu pour un enfant de cet âge.

Globalement, les résultats des études précédentes démontrent que le feedback auditif fourni par l'implant cochléaire peut être utilisé par les enfants sourds pour développer et contrôler leur parole. Toutefois, les progrès ne seraient pas automatiques et une période d'expérience avec l'information auditive serait nécessaire afin d'égaliser les performances obtenues par les enfants porteurs d'appareils conventionnels avec les seuils auditifs les plus élevés. Avec le temps, les patrons de développement observés tendent à se normaliser, mais la majorité des enfants implantés continuent néanmoins à se fier à des indices non-acoustiques, telle que la vision, pour guider leur production. Finalement, les analyses des systèmes phonologiques et de la précision articulatoire démontrent que malgré des progrès significatifs, la qualité de la parole de ces enfants demeure toujours à des niveaux inférieurs à ceux atteints par leurs pairs normo-entendants du même âge auditif et/ou chronologique, ce qui suggère que les progrès observés à la suite de la restauration sensorielle ne s'avèrent toutefois pas suffisants pour permettre de contrecarrer complètement les séquelles laissées par la privation auditive antérieure.

1.3.6.2 Intelligibilité

Parmi la multitude de mesures pouvant être utilisées pour l'évaluation de la parole chez l'enfant, celle possédant le niveau de validité écologique le plus élevé en lien avec la capacité réelle à communiquer oralement est sans contredit celle de l'intelligibilité, puisque cette mesure reflète le but ultime de toute communication, i.e. celui de se faire comprendre de son environnement. Cependant, évaluer l'intelligibilité de la parole des enfants atteints de surdité implique plusieurs aspects. En tout premier lieu, il s'avère indispensable de définir le type de tâche utilisé et qui repose généralement sur les échelles de qualité ou sur les procédures écrites (Samar & Metz, 1988). Deuxièmement, le type de juges utilisé pour qualifier les productions de parole doit être déterminé. Ces juges peuvent être expérimentés avec la parole des individus sourds (éducateurs pour les sourds, audiologistes, orthophonistes) ou non-expérimentés/naïfs. Finalement, un troisième paramètre est le type de

matériel utilisé qui inclut généralement de la parole spontanée ou des échantillons d'imitation, provenant de mesures déjà standardisées.

La question de l'intelligibilité des enfants porteurs d'implants intéresse les chercheurs depuis le début des années'90. Tobey, Angelette, Murchison, Nicosia, Sprague, Staller, Brimacombe, et Beiter (1991) rapportent les scores d'intelligibilité obtenus par un groupe de 61 enfants sourds implantés, âgés entre 2 et 18 ans. Les juges expérimentés avaient à écouter les enregistrements contenant des phrases lues par les enfants implantés et à écrire ce qu'ils croyaient avoir été dit par les enfants. Après un an d'expérience auditive, 2/3 des enfants avaient amélioré leur intelligibilité. Les auteurs concluent donc que l'implant cochléaire pouvait aider ces enfants à développer de meilleures habiletés expressives. Des résultats comparables ont été obtenus par Tobey & Hasenstab (1991) qui ont eu recours à une procédure similaire avec 24 enfants.

Osberger, Maso et Sam (1993) ont effectué plusieurs modifications intéressantes aux devis de recherche précédents. Ils ont d'abord étudié l'intelligibilité en fonction du type d'amplification (implant cochléaire, appareils vibro-tactile ou appareils d'amplification) et de l'âge auquel l'enfant commençait à l'utiliser. De plus, les auteurs ont utilisé une procédure écrite avec des juges naïfs. Après quatre années d'expérience, les participants qui avaient été implantés avant 10 ans présentaient les niveaux d'intelligibilité les plus élevés. Toutefois, tout comme il l'avait été observé dans les études de production de parole, les performances des enfants implantés ou utilisateurs de prothèse vibro-tactile demeuraient inférieures à celles des participants appareillés présentant les seuils de perception auditive plus élevés.

Osberger, Robbins, Todd, Riley, & Miyamoto (1994) émettent l'hypothèse qu'avec une plus longue expérience auditive, les performances des enfants implantés pourraient surpasser celles de leurs pairs avec appareils d'amplification standards. Ils ont donc suivi des enfants dont la restauration datait d'environ cinq ans. Des améliorations dans l'intelligibilité sont observées. Toutefois, les scores des enfants avec implant cochléaire sont malgré tout demeurés inférieurs, d'environ 30%, à ceux des enfants appareillés. Des résultats similaires

sont également rapportés par d'autres auteurs dont Robbins, et al. (1995) ; Miyamoto, Svirsky, Kirk, Robbins, Todd et Riley (1997).

Les études précédentes ont mesuré l'intelligibilité en ayant recours à une procédure écrite. D'autres ont évalué l'intelligibilité en ayant recours à une échelle de cotation conçue pour juger de la qualité de la parole spontanée. Dans ces études, on a visé à déterminer le lien entre l'intelligibilité et certains facteurs cliniques tels que le niveau de perception de la parole (O'Donoghue, Nikolopoulos, Archbold, Tait, 1999), le mode de communication (Archbold, Nikolopoulos, Tait, O'Donoghue, Lutman & Gregory, 2000) et l'expérience avec la prothèse (Allen, Thomas, Nikolopoulos, O'Donoghue, 1998).

On peut tirer trois conclusions des travaux menés sur l'intelligibilité de la parole des enfants sourds prélinguaux implantés. Premièrement, l'intelligibilité de ces enfants s'améliore à la suite de la chirurgie et progresse à mesure qu'augmente l'expérience avec la prothèse. Deuxièmement, l'implant cochléaire permet des améliorations qui peuvent se comparer à celles des enfants appareillés présentant les seuils auditifs les plus élevés. Troisièmement, le mode de communication à prédominance orale influence positivement les performances. Aucune de ces recherches n'a comparé l'intelligibilité de ces enfants avec celle de leurs pairs normo-entendants. Chin, Tsai et Gao (2003) ont comparé l'intelligibilité d'enfants implantés à celle d'enfants avec audition normale. L'expérience avec l'implant cochléaire variait entre 6 et 67 mois. Les résultats ont montré que les enfants implantés âgés et avec la plus longue expérience auditive présentaient les taux d'intelligibilité les plus élevés. Cers 4 ans, les enfants entendants présentaient des niveaux d'intelligibilité « adultes ». De tels niveaux ne sont jamais atteints par les enfants implantés. Monsen (1981) avance qu'avec taux d'intelligibilité inférieure à 60%, il est difficile pour un locuteur de se faire comprendre. Les résultats de Chin et al. (2003) ont montré que 73% des enfants implantés présentaient des niveaux d'intelligibilité inférieurs à ce seuil critique. Ainsi, une restauration auditive ne garantit pas directement l'amélioration de l'intelligibilité chez la plupart des enfants implantés.

1.3.7 Influence de l'âge à l'implantation

Les études sur le développement de la parole et de l'intelligibilité des enfants IC suggèrent que la restauration sensorielle améliore les capacités expressives. Toutefois, alors que certains enfants progressent bien avec l'implant cochléaire, d'autres semblent incapables de bénéficier de l'information acoustique pour développer leur parole. Actuellement, il est impossible d'expliquer avec précision les raisons de ces différences interindividuelles. Toutefois, plusieurs facteurs ont été identifiés comme ayant une influence probable sur les bénéfices pouvant être espérés à la suite de cette chirurgie.

Ceux-ci peuvent se regrouper en trois catégories : les facteurs reliés à l'enfant lui-même tels que l'étiologie de la surdité, l'ouïe résiduelle, et la présence ou non d'un handicap additionnel; ceux reliés à son environnement telle que l'implication et la motivation des parents ainsi que leur statut socio-économique; et finalement ceux liés à la prothèse cochléaire et au programme de rééducation, tels que le nombre d'électrodes actives et le mode de communication (pour une explication détaillée de ces facteurs, voir Bouchard, Ouellet & Cohen, 2007).

L'âge à l'implantation est le facteur le plus fréquemment étudié en rapport avec la variabilité des performances. En effet, en raison de considérations biologiques, on considère souvent cette variable comme étant la plus cruciale pour les performances pouvant être atteintes à la suite de la chirurgie. On cite par exemple la plus grande plasticité cérébrale en bas âge, l'importance de l'expérience pour la maturation des centres auditifs centraux ainsi que la possible période critique ou sensible pour l'acquisition de la parole et du langage. De façon générale, on avance que l'implantation à un âge précoce, limite les délais de langage et par conséquent assure un meilleur développement de la parole (Geers, Nicholas & Sedey, 2003; Blamey et al., 2001; Svirsky, Robbins, Kirk, Pisoni & Miyamoto, 2000; Fryauf-Bertschy, Tyler, Kelsay, & Gantz, 1997; Tye-Murray et al., 1995). Par exemple, El-Hakim, Abdoell, Mount, Papsin, et Harrison (2002) rapportent que les enfants implantés après l'âge de 5 ans présentaient davantage de difficultés au niveau de l'acquisition du vocabulaire réceptif et expressif que leurs pairs implantés avant cet âge. Osberger, Zimmerman-Phillips et Koch (2002) rapportent qu'une implantation précoce favorise l'acquisition du langage oral.

Les enfants implantés avant 18 mois acquièrent le langage à un taux normal, parfois même accéléré, contrairement aux enfants implantés entre 41 et 48 mois qui présentaient des taux plus stables (Hammes, Willis, Novak, Edmondson, Rotz, Thomas, 2002). La majorité des enfants implantés avant 19 mois développent des compétences expressives et réceptives équivalant ou surpassant celles de leur âge chronologique. Les enfants implantés entre 20 et 25 mois présentent déjà des retards de langage (Miyamoto et al., 1997). Selon Yoshinaga-Itano, Coulter et Thompson (2000), l'avantage d'une implantation précoce est observé pour tous les niveaux socio-économiques, groupes ethniques, âges, genres, degrés de perte auditive ainsi que pour ceux qui utilisent la parole seule ou avec le langage signé.

Les résultats des études précédentes indiquent que la restauration sensorielle à un âge précoce permet des taux de développement du langage accélérés qui compensent pour les retards engendrés par la privation auditive. Toutefois, ces mêmes études omettent généralement de mentionner l'importante variabilité observée chez leurs participants y compris ceux implantés tôt. De tels résultats suggèrent que les enfants implantés en bas âge peuvent eux aussi présenter certaines difficultés à progresser et à améliorer leurs capacités expressives.

Ces études n'opposent également pas des groupes d'enfants qui se distinguent clairement au plan de l'âge auquel ils sont implantés. Pourtant, quelques mois représentent une énorme différence dans la vie d'un jeune enfant. Par exemple, Ertmer, Young, Grohne, Mellon, Johnson, Corbett, Saindon (2002) ont suivi le développement vocal de deux enfants sourds prélinguaux implantés à 10 et 28 mois. Ils ont montré que si le premier présentait rapidement des améliorations, ce n'était pas le cas avec le second qui présentait des difficultés ainsi que des taux d'acquisition plus lents. Les auteurs concluent que malgré une implantation précoce, certains enfants nécessitaient des stratégies plus spécialisées pour stimuler le développement de la parole et que l'implantation précoce ne garantissait pas systématiquement de meilleures capacités expressives.

Tout comme Ertmer et al (2002), d'autres études ne peuvent mettre en évidence le rôle significatif de l'âge à l'implantation. Miyamoto, Kirk, Svirsky, et Seghal (1999) ne

trouvent pas de différence entre les enfants implantés entre 2/3 ans et ceux implantés entre 3/4 ans quant au développement de la parole expressive six mois après l'implantation. Des enfants implantés avant deux ans présentent un développement auditif similaire à des enfants implantés entre deux et six ans (Anderson, Weichbold, D'Haese, Szuchnik, Quevedo, Martin, Dieler, & Phillips, 2004).

De plus, en matière d'implantation précoce, les auteurs s'avèrent incapables de s'accorder sur un âge minimal optimal. Seules des zones d'âge sont avancées allant parfois jusqu'à des différences de quatre et six ans, ce qui s'avère énorme pour un organisme en plein développement. Les progrès ne sont également pas uniquement observables chez les jeunes enfants. En effet, certains pré-adolescents arrivent à s'adapter au signal de la parole perçu via l'IC (Eisenberg, Berliner, Thielemeir, Kirk & Tiber, 1983). Finalement, dans une étude conduite avec des enfants sourds prélinguaux implantés entre 1 et 15 ans, Harrison, Gordon et Mount (2005) sont incapables de définir un âge spécifique à la suite duquel l'implantation cochléaire n'est plus utile pour le développement de la perception auditive et du langage. Les auteurs concluent qu'il existe probablement un moment où le cerveau est maximalelement plastique pour l'acquisition de la parole mais aucun à la suite duquel les progrès ne sont plus observables. Fallon, Irvine et Shepherd (2002) rapportent les impacts négatifs d'une surdité trop longue et par le fait même les bénéfices de l'expérience auditive sur les structures auditives centrales et le développement du langage. Toutefois les auteurs rappellent que ces facteurs n'expliqueraient que 20% de la variance dans les performances obtenues. À la lumière de tels résultats, il semble donc que d'autres facteurs que ceux liés à l'âge à l'implantation et à l'expérience auditive doivent être considérés pour expliquer les progrès ou l'absence d'amélioration à la suite de la restauration sensorielle.

1.4 Limites des études antérieures et objectifs du projet actuel

Telle que la revue de littérature précédente a pu le démontrer, un certain nombre de travaux ont été menés à propos des habiletés expressives des enfants sourds prélinguaux ayant reçu un IC. Ces travaux ont grandement aidé à notre compréhension du développement dans les premiers mois d'expérience auditive. Toutefois, certains aspects du développement

demeurent encore imprécis et certaines faiblesses méthodologiques limitent les conclusions pouvant en être tirées.

Tout d'abord, la majeure partie des études ont été effectuées auprès d'enfants anglophones. Très peu de travaux ont donc été menés auprès d'enfants implantés provenant de milieux dont la langue maternelle est le français. Malgré certaines ressemblances entre ces deux systèmes linguistiques, les conclusions tirées d'études avec des populations anglophones ne sont pas toujours applicables aux à celles francophones. Par exemple le français possède une opposition vocalique basée sur l'arrondissement, seul trait visible, ce qui rend leur étude très intéressante dans un contexte impliquant la parole d'enfants sourds. Ainsi, les patrons de développement risquent d'être quelque peu différents selon la langue.

On remarque également que l'on eut recours à des tests standardisés administrés dans le mode de communication privilégié de l'enfant implanté. Une telle procédure surestime les capacités expressives des participants. L'imitation est également utilisée, affaiblissant ainsi la validité écologique de la tâche. De plus de telles mesures ne nous renseignent pas sur les patrons de développement linguistique.

Les études sur le développement de la parole sont généralement ponctuelles. Rares sont les travaux qui se déroulent dans une perspective développementale en ayant recours à un plan de recherche de type longitudinal. Par ailleurs, les quelques travaux ayant effectué des suivis sur plus d'une année connaissent des taux de mortalité expérimentale importants qui limitent leur portée. C'est la raison pour laquelle la plupart des auteurs optent pour recherches de type transversal. Bien que plus rapide, cette procédure n'est toutefois pas aussi puissante que les approches longitudinales.

Enfin, les enfants implantés constituent un groupe hétérogène. Plusieurs variables démographiques, de santé et de développement telles que l'étiologie de la surdité, la quantité et le type de réhabilitation pré- et postimplantation sont souvent mal définis ou absentes, ignorant ainsi l'influence qu'elles peuvent avoir sur les performances observées. Ainsi, le suivi longitudinal d'une cohorte d'enfants sourds prélinguaux implantés provenant de milieux

francophones s'impose. Le présent projet consistait donc à caractériser le développement, au cours des trois premières années suivant la restauration sensorielle, des capacités de parole d'un groupe d'enfants sourds prélinguaux francophones implantés entre 24 et 78 mois.

1.5 Introduction aux articles

Le présent projet consistait à effectuer un suivi longitudinal à moyen-terme d'un groupe d'enfants sourds prélinguaux, issus de milieux francophones, ayant reçu un implant cochléaire de manière à pouvoir clarifier les patrons de développement de leur parole et de leur intelligibilité. Un second objectif était de déterminer le rôle de l'âge à l'implantation sur les performances. Pour ce faire, une revue de littérature et deux études expérimentales ont donc été menées.

La revue de littérature avait comme principal objectif de faire le point sur les travaux ayant été menés sur la parole produite par les enfants sourds pré-linguistiques ayant reçu un implant cochléaire. Les prothèses cochléaires ainsi que leurs fonctionnements ont d'abord été décrits tout comme l'ont été les facteurs cognitifs, sociaux et cliniques reconnus pour jouer un rôle déterminant dans les performances post-chirurgicales.

Pour la première étude, 21 enfants sourds prélinguaux, implantés entre 24 et 78 mois ont été suivis durant les 18 premiers mois d'expérience auditive. Les productions de parole spontanée ont été filmées et enregistrées et des inventaires de parole ont été obtenus en faisant la liste de tous les segments produits, c'est-à-dire les phones glossables et non-glossables de type vocalique et consonantique. Le rythme de développement a également été évalué par le biais de deux critères d'acquisition.

L'objectif de la seconde étude était de suivre, durant les 3 premières années d'expérience auditive, l'évolution de l'intelligibilité en demandant à 40 auditeurs naïfs et 2 transcripteurs expérimentés d'identifier les syllabes produites par un groupe de 12 enfants sourds prélinguaux ayant reçu un IC. Cette procédure a été développée afin de pouvoir utiliser les échantillons de parole spontanée reconnus pour être plus représentatifs des véritables capacités expressives des enfants. Il était prédit qu'une augmentation du taux d'accord inter-juges entre les auditeurs naïfs et expérimentés reflétait une amélioration dans la prononciation des enfants. Étant donné l'intelligibilité limitée des enfants dans les premiers mois d'expérience auditive, les voyelles ont été classées selon l'espace vocalique et les consonnes selon le lieu articulaire.

Dans ces 2 études, l'influence de l'âge à l'implantation a été étudiée. Pour limiter au maximum l'impact potentiel de facteurs alternatifs sur la variable de l'âge, les participants choisis ne devaient présenter aucun handicap additionnel à la surdité et devaient tous avoir été exposés au même mode de communication, soit la communication totale.

CHAPITRE II

ARTICLES

2.1 ARTICLE 1

Speech development in prelingually deaf children with cochlear implants

Marie-Eve Bouchard, Christine Ouellet, & Henri Cohen

Soumis et accepté *Linguistic Compass*

SPEECH DEVELOPMENT IN PRELINGUALLY DEAF CHILDREN
WITH COCHLEAR IMPLANTS

Marie-Eve Bouchard¹, Christine Ouellet^{1,2}, and Henri Cohen^{1,3}

¹ Cognitive Science Institute, Université du Québec à Montréal, Canada

² Hôpital Louis-H. Lafontaine, Montreal, Canada

³ Psychology and Cognitive Neuroscience Laboratory, Université Paris Descartes-
CNRS, France

Acknowledgment: This research was aided by grants fromm SSHRC (Ottawa) and

FQRSC (Québec). Address correspondence to M-E.B.

(marie_eve_bouchard_2001@hotmail.com) ot to H.C. (henri.cohen@univ-paris5.fr).

Développement de la parole d'enfants sourds prélinguaux avec implants cochléaires

Résumé

Depuis le début des années 1980, l'implantation cochléaire est une méthode approuvée pour le traitement des surdités sensorielle profondes et bilatérales chez les enfants. Il est suggéré que l'utilisation de cette prothèse permettrait à ces enfants de développer la parole et ainsi que l'habileté à participer à une communication auditivo-orale. Toutefois, si les améliorations aux plan réceptifs et perceptuels ont été largement documentés, les bénéfices expressifs ont été moins largement étudiés. L'objectif principal de cet article est de faire une revue de littérature des travaux ayant été mené sur la parole produite par les enfants sourds prélinguistiques ayant reçu un implant cochléaire. Les prothèses cochléaires ainsi que leurs fonctionnements sont d'abord décrits tout comme le sont les facteurs cognitifs, sociaux et cliniques reconnus pour jouer un rôle déterminant dans les performances post-chirurgicales. Globalement, les résultats suggèrent que l'implantation cochléaire permet d'accélérer le rythme d'acquisition à des taux se rapprochant de ceux retrouvés dans le développement normal, mais que certains retards initiaux demeurent irréversibles. Enfin, des explications encore partielles sont disponibles pour expliquer la grande variabilité qui caractérise généralement les performances.

Speech development in prelingually deaf children with cochlear implants

Abstract

Since the early 1980s, cochlear implantation has been an approved method for treating profound bilateral sensorineural hearing loss in children. It is widely believed that the use of this device would significantly benefit young deaf children's development of speech and ability to participate in aural-oral communication. However, whereas significant improvement in speech reception and perception skills following implantation has been widely documented, cochlear prostheses as speech production aids have been studied less extensively. The main objective of this paper is to review the work conducted on speech produced by prelingually deaf children following cochlear implantation. Cochlear implants and their functioning are described, as are the cognitive, social and clinical factors known to play a role in successful implantation of children. It is concluded that cochlear implantation may speed up speech production to near normal rates but initial delays are not totally reversible. In addition, the variability in all performance measures is high, and the reasons for good and poor outcomes are only partly understood.

Introduction

It is well known that childhood deafness can have a severe impact on speech and language development. Language—in our society, oral language—is the primary means through which socialization and learning occur. Speech and language develop rapidly in the first years of life, primarily through normal family interaction. When communicative interactions between a child and his or her family are disrupted during these early critical years, serious delays in cognitive development are likely to occur. If the deprivation goes on for a long time, the child may never make up for lost learning, even after extensive rehabilitation (Hodges and Balkany, 2002). Thus, severe to profound hearing loss has the potential to adversely affect crucial aspects of development, including social, cognitive, and academic abilities, mostly because of a delay in oral language (Klein and Huerta, 1992).

It is estimated that one out 1,000 children will present with severe to profound sensorineural hearing loss before 3 years of age (Schein, 1987). Common risk factors include extremely low birth weight, cytomegalovirus, genetic syndromes, meningitis, and post-birth treatments such as strong antibiotics. Until the early 1980s, there was no comprehensive treatment for hearing loss that would allow profoundly deaf individuals to understand speech. Since then, technological advances have led to the development of cochlear implants, which now permit some profoundly deaf children who receive little benefit from conventional hearing aids to access environmental sounds and spoken language. It is widely believed that the use of this new technology, combined with rehabilitative therapy, would significantly benefit young deaf children's development of speech and ability to participate in aural-oral communication (Robinshaw, 1996; Makhdoum, Snig, and Van den Broeck, 1997).

Significant improvements in speech reception and perception following implantation have been widely documented (e.g., Go et al., 1998; Govaerts et al., 2002; Nikolopoulos, Archbold, and O'Donoghue, 2006). Speech production, however, has received less attention. Given the strong relationship between language perception and production, assessing how well implanted children's speech abilities develop is important. The effectiveness of the implant procedure must also be assessed for its capacity to enable these children to develop both the phonetic and phonological features of speech and refine the articulatory gestures

necessary to distinguish one sound from another.

In this paper, we focus on the speech acquisition of prelingually deaf children who received a cochlear implant. The major results will be summarized in terms of linguistic objectives—phonetic/phonological development and speech intelligibility. Most of the studies reviewed here studied English-learning children. When another language is investigated, this will be stated in the text. In addition, a significant part of this review will be dedicated to the factors affecting speech outcomes in these children. Although everyone seems to agree on the benefits of cochlear implantation, the outcomes still vary to a great extent. A number of supposed contributing factors will therefore be discussed, including age at implantation, mode of communication and the parents' role in the implanted child's rehabilitation.

Hearing, deafness and how a cochlear implant works

In order to understand exactly what a cochlear implant is and what it does, it is important first to understand the normal process of hearing as well as the medical condition of hearing impairment. Sound is represented in two dimensions: loudness and pitch. Loudness is measured in decibels (dB) while pitch is measured in cycles per second (cps). Hearing-impaired individuals are commonly thought to lack the ability to hear sounds below a certain loudness level. This is exactly what happens to many adults as they grow older and explains why, for some people, simple amplification devices (such as hearing aids) can be useful. For most prelingually deaf children, however, the loss is not limited to the ability to hear sounds below a certain level but also affects the ability to hear certain pitches. Thus, people with severe and profound sensorineural hearing losses not only fail to hear sounds but also often fail to discriminate between them when they can hear them.

In normal hearing, sound travels through the outer ear, middle ear, inner ear and auditory nerve to the brain while undergoing a series of transformations. The outer ear picks up acoustic pressure waves that small bones in the middle ear convert to mechanical vibrations. The cochlea, a twisted cavity filled with fluid within the inner ear, converts these mechanical vibrations into vibrations in fluid. Pressure variations within the fluid of the

cochlea lead to displacements of a flexible membrane, called the basilar membrane. These displacements contain information about the frequency of the acoustic signal. Attached to the membrane are tiny hairs that bend according to the membrane displacement, releasing a substance that causes neurons to fire, signaling the presence of excitation at a particular site in the inner ear. These neurons communicate with the central nervous system and transmit information about the acoustic signal to specialized brain areas.

The hair cells attached to the basilar membrane are responsible for translating mechanical information into neural information. In most hearing-impaired individuals with sensorineural hearing loss, these hair cells have massively degenerated or are entirely absent, resulting in the failure of sound transmission to the brain—as the hair cells of the cochlea cannot transform sound into neural impulses. A cochlear implant therefore aims at bypassing the normal hearing mechanism of the outer, middle, and part of the inner ear, and electrically stimulates the remaining auditory neurons directly.

Electrodes (currently, anywhere from 6 to 24) are surgically implanted in the cochlea in the location of the defective or non-existent hair cells. However, the electrodes cannot receive sound waves directly from the structure of the middle ear. This is why a cochlear implant includes external components: a microphone, a signal processor and a transmitter. The microphone (worn above the ear) captures acoustic signals (speech or other sounds), transducing them into an analog electrical signal that is sent to the processor. In turn, the processor modifies (amplifies, compresses, filters and shapes) the signal into the desired pattern (various processing schemes are available) and sends this transformed signal to an external transmitter placed on the skin, using radiofrequency transmission to a subcutaneous receiver/stimulator embedded in the mastoid bone directly beneath the transmitter. An array of one or more electrodes extends from the receiver/stimulator and is inserted into the cochlea, generally through the round window and around the scala tympani of the basal turn of the cochlea. Thus positioned, the electrodes can deliver electrical stimulation to excite the cochlear neurons of the auditory nerve, bypassing the missing or damaged hair cells, and finally producing a sensation of sound.

The technological advantage of this system over previous hearing aids cannot be overstated. Other systems attempt to amplify sounds without improving frequency discrimination but the cochlear implant attempts to solve the problem of sound transmission and representation at its source. By attacking the problem at the neural level, the cochlear implant provides information on both the loudness and pitch dimensions. It follows that the implant enables virtually all conversational sounds to be detected and offers hearing sensitivity and functioning corresponding to a mild to moderate hearing loss. However, for all their promise and their improvement over other systems, current cochlear implants are still a fairly crude reproduction of our internal auditory system. All the sound nuances that can be detected and conveyed by a fully functioning cochlea with its 16,000 hair cells cannot be completely replaced by a processor that is connected to only a few electrodes, as some of the “quality” and “character” of voice is undeniably lost. Even a high-functioning implant will still have trouble with certain vocal nuances. Moreover, the signal received is not exceptionally clear. The problem is exaggerated when there is a lot of background noise (as in a crowded room) and the processor must try to make sense of multiple sound signals. The key point is that, while beneficial, the signal is still a poor reproduction and interpretation of real sounds. Finally, a cochlear implant does not interpret sound. Nor does it guarantee the ability to understand complex connected spoken language. Users must be systematically taught to listen “electronically” as opposed to “acoustically” and to make sense of the signals in order to translate them into sounds that will be useful for communication. Making sense of the sounds available through the implant is a procedure that each child must master and is the result of long hours of hard work with therapists and teachers. Post-implant training and therapy are therefore crucial to making the device work properly.

Candidacy criteria

Not all hearing-impaired individuals are candidates for cochlear implantation. Current guidelines permit cochlear implantation in people 2 years of age and older with severe to profound deafness (i.e., pure tone average threshold of 70 dB HL or greater) and in patients under age 2 years with profound deafness (i.e., pure tone average threshold of 90 dB HL or greater). Absolute contra-indications to the selection of a patient for cochlear implantation include cochlear agenesis, complete obliteration of the eighth nerve and substantial progress

with the use of hearing aids. As cochlear implant devices continue to improve, the criteria regarding the degree of hearing loss and the performance with a hearing aid that warrants consideration of a cochlear implant will also continue to evolve.

Speech improvement in deaf children following cochlear implantation

Speech research in prelingually deafened cochlear-implanted children is a relatively new scientific interest and a number of methodological considerations make it difficult to draw general conclusions. The main difficulty is that implanted children constitute a heterogeneous group with varying audiological and educational characteristics. Each child has a very different individual history. As well, variables such as the etiology of deafness, the amount and type of speech-language therapy before and after surgery, and other social factors exert some influence on speech and language development. Few studies take these considerations into account, and intervening effects or variables are often poorly defined.

Another factor that makes it difficult to interpret results is that cochlear implant technology is improving rapidly. Thus, over time, it is difficult to compare the findings of different studies simply because some of them relate to technology that is no longer in use (as with certain types of implants or speech coding strategies.)

Although direct comparison of studies examining the segmental characteristics of the speech of implanted children is difficult, three general methods are frequently used to collect speech utterances: videotaped spontaneous language samples of unstructured conversations or play situations between the child and a familiar adult, the repetition of CV syllables, and the elicitation of single words by means of picture-naming. Each of these sample types has potential benefits and disadvantages, and the profile of child skills revealed may differ depending upon the measures employed (for a review, see Morrison and Shriberg, 1992).

One of the first published reports on speech production following cochlear implantation in children was by Kirk and Hill-Brown (1985). The authors examined both imitative and spontaneous speech capacity in a group of 36 children who had received a monochannel cochlear implant. Both pre-implant and 6-month post-implant speech

production were collected. The participants' age at the time of implantation was between 2 and 18 years. At 6 months post-implant, the children showed significant improvement in the imitative production of vowels, diphthongs (e.g., /ei/, /aI/, /aj/) and consonants; however, no significant improvement was seen in the imitative production of consonant clusters or blends (e.g., /spl/, /ts/, /spr/). Similar improvements were observed at the one-year post-implant interval. For spontaneous speech, there was a similar trend towards improved segment production as experience with the cochlear implant increased.

Tobey, Pancamo, Staller, Brimacombe, and Beiter (1991) examined consonant production in children before fitting them with a multichannel cochlear implant and after one year of device use. They found that after implantation, more children produced consonants. Phonemes with visible places of articulation were used more often than those with less visible places. The authors contrasted their results with those of Smith (1975), who reported on the speech abilities of children with conventional hearing aids. The comparisons suggested that Tobey et al.'s data with implanted children were quantitatively similar to Smith's in terms of the types of sounds produced. The qualitative similarities between the two groups of hearing-impaired children (with and without cochlear implants) raised questions concerning the real effectiveness of this device for the development of speech abilities. It is important to remember that children without cochlear implants may also show some improvement. A series of studies were therefore conducted to determine the extent to which the speech improvement was due to the implant, rather than to natural maturation. To do so, these studies introduced the use of control data, namely children using other devices.

Kirk, Diefendorf, Riley, and Osberger (1995) compared the consonants produced in CV syllables by cochlear implant children at two points in time; they also compared the implanted children's consonants with those in syllables produced by hearing aid users with various levels of hearing loss. Cochlear implant users demonstrated significant improvements in the production of voicing, place and manner features after approximately 2.6 years of device use. In addition, production by the cochlear implant users at the second interval was usually better than that observed for hearing aid users with the lowest mean PTA (pure tone audiometry), but comparable to that of hearing aid users with the highest mean PTA.

Ertmer, Kirk, Sehgal, Riley, and Osberger (1997) and Sehgal, Kirk, Svirsky, Ertmer, and Osberger (1998) respectively compared the vowel and consonant production of 10 cochlear implant users and 10 vibrotactile users. Imitative speech production was elicited and transcribed from children with prelingual deafness before they received their device and after an average of 18 months of device use. At the pre-device interval, both groups demonstrated similar imitative abilities. After experience with the device, cochlear implant subjects demonstrated significantly better speech production than vibrotactile users, on most vowel and consonant features.

Other authors have investigated the quality of speech produced by the implanted children. To do this, the authors looked at confusion matrices or presented a thorough description of the sound repertoires of these children in order to assess their speech accuracy. Tye-Murray and Kirk (1993) reported on vowel accuracy in a group of implanted children at 6, 12, 18, 24 and 36 months post-surgery. Confusion matrices showed that the number of vowels or diphthongs that were correctly produced or substituted for vowels in their respective categories increased steadily throughout the time of the investigation.

Tye-Murray, Spencer, and Woodworth (1995) studied the errors in the consonants produced by a group of children implanted between 31 and 170 months of age after an average of 36 months of auditory experience. Their confusion matrix showed, with respect to manner of articulation, that stops and nasals were produced most accurately and fricatives least accurately. With respect to place of articulation, consonants with visible articulatory movements, such as bilabials and labiodentals, were more likely to be correct.

Finally, Chin (2003) presented a qualitative description of the consonant inventories of 12 children with at least 5 years of implant experience. The author also described the sound correspondences between the children's systems and the ambient language. Examination of the consonant inventories revealed the presence of non-English segments in the participants' consonant inventories. Chin concluded that it is likely that some inaccuracy in the overall impression of speech quality may be related to these non-ambient segments,

and stressed that successful acquisition of a speech system involves not only inclusion of all ambient segments, but also exclusion of all non-ambient ones.

All the studies cited above, which applied diverse methods of data collection and observation methods, reported an increase in the sound repertoire or in the accuracy of articulation in subjects using cochlear implants after relatively short periods of implant experience.. However, it should be noted that, although improvement is often seen, complete inventories and perfect speech accuracy are rarely attained, even after several years of auditory experience. Serry and Blamey (1999) and Blamey, Barry, and Jacq (2001) followed the phonetic and phonological development of prelingually deaf children implanted before age five, 4 and 6 years after the surgery, to determine whether speech improvement was continuous or eventually slowed down as the children grew older. Their results showed that the process of phone acquisition in these children was systematic but slower than would be expected in normally hearing children. Learning curves became stable after five years of auditory experience, even though some consonants were still missing from the repertoire. Decreasing brain plasticity for speech acquisition was hypothesized to account for this stabilization effect.

Most of the studies cited here are either longitudinal or cross-sectional, or sometimes both, but always involving groups of children and therefore grouped data. Although grouped data are useful for discerning broad developmental patterns in the population of cochlear implant users, inter-subject variability cannot be seriously addressed if complete descriptions are not available for individual subjects. To this end, case studies provide in-depth descriptions of the developing speech capacity in prelingually deafened children who received a cochlear implant.

Ertmer (2001) and Ertmer and Mellon (2001) chronicled vowel and consonant changes in the spontaneous utterances of a child implanted at 19 months of age and followed during the first 12 months of auditory experience. Increases in the production of all vowel and consonant types and features revealed that this child relied on auditory information to construct her speech repertoire.

Chin and Pisoni (2000) reported on a developing phonological system produced by a prelingually deaf child approximately two years after receiving a cochlear implant. Their observations indicated that, despite the presence of complex speech sounds and segments (with both vowels and consonants), the child's phonological system was not age-appropriate. They also reported that, although the child's productions showed some singletons where the ambient language had clusters and some open syllables for ambient closed syllables, there did not appear to be absolute constraints against clusters or closed syllables.

Globally, the results of the studies presented above showed that the acoustic feedback provided by multichannel cochlear implants can help deaf children to develop and monitor their speech. However, significant progress is not automatic and a substantial period of auditory experience with the device is necessary for implanted subjects to outperform hearing aid users who have more residual hearing, as indexed by pure tone thresholds. Although developmental patterns tend to gradually normalize, the majority of implanted children continue to rely on extra-auditory cues, such as visual information, to guide their production. Finally, analysis of phonological systems and speech accuracy show that, despite significant progress, the speech quality of implanted children usually remains well below the levels reached by their normally hearing peers.

Speech intelligibility following cochlear implantation

Among the myriad measures used to assess speech production in children, the one with the highest face validity as regards the need to communicate using spoken language is overall speech intelligibility. Measuring the speech intelligibility of children with hearing impairments has generally relied on two types of task: rating scales and write-down procedures (Samar and Metz, 1988). A second consideration is the type of listener judge: roughly, listeners who have experience with the speech of deaf people (including educators of the deaf, audiologists and speech-language pathologists) vs. inexperienced or naive listeners. Finally, a third aspect is the type of speech material collected: spontaneous or standardized speech.

A number of studies since the early 1990s have addressed the question of speech intelligibility of children with cochlear implants. Tobey, Angelette, et al. (1991) reported the intelligibility scores obtained by a group of implanted children who were asked to read sentences. Experienced judges listened to the recordings of the children reading the sentences and wrote down what they thought had been said. After one year of auditory experience, 63% of the children improved their speech intelligibility. The authors concluded that multichannel cochlear implants may assist prelingually deaf children in developing better speech.

Osberger, Maso, and Sam (1993) introduced a number of innovations in their research on the speech intelligibility of children using a cochlear implant. First, they examined intelligibility as a function of assistive device (cochlear implant, tactile aid or hearing aid) and age at device fitting. Second, they employed a write-down procedure with naive listeners who served as judges. After four years of auditory experience, the subjects with early onset of deafness who received their single- or multichannel cochlear implant before age 10 demonstrated higher levels of speech intelligibility than the groups of children implanted after 10 or who used a tactile aid device. The authors concluded that electrical stimulation of the cochlear implant was more efficient for the development of speech abilities than information delivered via the sense of touch by the tactile aids. It should, however, be noted that the post-implant or tactile aid speech intelligibility of subjects with early onset of deafness remained lower than that of hearing aid users with the best aided perception, suggesting that perception had more impact on outcome than age at device fitting.

Osberger, Robbins, Todd, Riley, and Miyamoto (1994) hypothesized that the improvements in speech intelligibility found by Osberger et al. (1993) might continue with increased device use. They therefore examined speech intelligibility in children who had been using cochlear implants for up to five years. Their results showed gradual improvement over time in intelligibility scores for children using cochlear implants. Their intelligibility scores remained low for the first two years post-implant but improved significantly after 2.5 years. At all intervals, however, their scores remained clearly below those of hearing aid users with the best residual hearing. Very similar results were reported by other authors (Robbins, Kirk, Osberger, and Ertmer, 1995; Miyamoto, Svirsky, Kirk, Robbins, Todd, and Riley, 1997).

All of the above-mentioned reports measured intelligibility using a write-down procedure. Another series of reports assessed intelligibility with a rating scale specifically developed to rank the spontaneous speech of implanted children. These studies also attempted to determine the relationship between speech intelligibility after cochlear implantation and factors such as speech perception (O'Donoghue, Nikolopoulos, Archbold, and Tait, 1999), communication mode (Archbold et al., 2000) and experience with the device (Allen, Nikolopoulos, and O'Donoghue, 1998). A large sample ($n = 84$) of prelingually deafened children who received a cochlear implant before age seven were tested once before implantation and then followed at yearly intervals for up to five years. Overall, the results obtained were comparable to those derived with the standard write-down procedure. On average, intelligible connected speech did not begin to develop significantly until year 3 after implantation. The authors highlighted the importance of speech perception for the development of intelligibility as well as rehabilitation programs focusing on oral communication.

Past studies of the connected speech intelligibility of implanted children lead to three main conclusions. First, the children's speech intelligibility improves after surgery and then further improves with increased use of the cochlear implant device. Second, cochlear implants help as much with the development of speech intelligibility as conventional hearing aids. Finally, factors such as experience with the device, speech perception and communication modes contribute to the expected outcomes. However, none of the research has yet addressed the extent to which implanted children differ from those with normal hearing. Determining how intelligible children with cochlear implants are relative to their normally hearing peers has implications for expectations regarding the outcomes of pediatric cochlear implantation—given that the goal of most auditory-oral educational programs is to “mainstream” the students into a regular classroom education.

Chin, Tsai, and Gao (2003) compared the intelligibility of connected speech in implanted children with data from normally-hearing peers. Length of implant use ranged between 0.5 and 5.7 years. For children with cochlear implants, greater intelligibility was

associated with both increased chronological age and increased duration of implant use. Children with normal hearing achieved adult-like or near-adult-like intelligibility around the age of four; a similar peak was not observed for implanted children despite similar length of auditory experience. Monsen (1981) found that, with an intelligibility level below 60%, “listeners are confronted with overwhelming difficulty in understanding what was said.” Chin et al. (2003) showed that 73% of implanted children had intelligibility scores below this level. Thus, despite increasing auditory experience, children with cochlear implants remained significantly less intelligible than children with normal hearing. Ertmer, Strong and Sadagopan (2003) reported similar results.

Factors affecting speech outcomes following cochlear implantation

Overall, studies on the speech production and intelligibility of prelingually deaf children who receive a cochlear implant strongly suggest that access to acoustic information permits some improvement in the area of connected speech intelligibility and speech production abilities. However, one of the most consistent findings reported in studies on pediatric cochlear implantation is the great variability in individual performance observed on all speech and language measures (Tobey et al., 2003; Geers, 2006). Whereas some children do very well with their implants, others do poorly. At present, a good understanding or explanation of these large individual differences does not exist, but several factors have already been identified as contributing to this variation in performance. These include the child’s own characteristics, the family environment, and the specific features of the child’s implant and rehabilitation program. The factors that are most frequently reported as having a significant impact on speech acquisition and development in these children are discussed here.

Child characteristics

Etiology of deafness: Studies show that the cause of deafness may be related to outcomes with the cochlear implant. These results may, however, be misleading. When etiology was found to be a significant predictor of outcome, it was often the case that other disabilities were related to the etiology and negatively affected performance (Isaacson, Hasenstab, Wohl, and Williams, 1996; Bauer, Geers, Brenner, Moog, and Smith, 2003).

Additional disabilities: Children with disabilities in addition to their auditory impairment may experience further obstacles in learning oral language (Isaacson et al., 1996; Rajput, Brown, and Bamiou, 2003; Spencer, 2004). Lesinski, Hartrampf, Dahm, Bertram, and Lenarz (1995) reported the successful cochlear implantation of a large group of children with one or more disabilities in addition to deafness. Disabilities that were considered to have an effect on post-operative outcome included mental retardation, autism, cerebral palsy, and a variety of genetic syndromes. Teagle and Moore (2002) suggest that, although the presence of additional disabilities in a child contra-indicates implantation in some cases, the valuable sensory information which the device could provide should be weighed for each case. Apparently, these factors do not necessarily preclude the child from being a candidate for cochlear implantation.

Cognitive factors and intelligence: Geers et al. (2002) found that performance on a nonverbal intelligence test accounted for significant variance in auditory, speech, language, and reading outcomes in children who received an implant between the ages of 2 and 5 years. Once this variable was held constant, other variables such as age at implantation and age at onset of deafness did not contribute to speech perception and production. Other reports did not find this type of relationship with nonverbal IQ scores, but did find one with specific WISC-R subtests such as Picture Arrangement and Block Design (Quittner and Steck, 1991).

Pisoni and Cleary (2003) investigated the role of working memory in speech recognition, intelligibility, language-processing and reading in a group of prelingually deaf children with cochlear implants. Using the digit span subtest of the WISC-R, moderate to high correlations were obtained between test performance and each of the four outcome measures, namely speech perception and production, language and reading. In addition to short-term working memory, other cognitive functions such as attention, categorization, learning, and memory have been suggested to influence how the cognitive system processes the sensory input provided by cochlear implants.

Age at onset of deafness: It appears that the age at onset of deafness may affect a child's post-implant performance on a range of outcome measures. Even a short period of

hearing apparently provides benefits in using the implant effectively or in learning how to speak. Although congenitally deaf children with a profound hearing loss are almost completely deprived of meaningful sound until implantation, Spencer (2004) found that auditory experience provided by hearing aids before implantation can affect post-implant performance. Geers, Nicholas, and Sedey (2003) found that the onset of deafness after birth predicted better scores for overall language/speech development. Geers et al. (2002) found similar results in an earlier study of rehabilitative factors in cochlear implant users. Children who experienced some period of normal hearing exhibited a marked trend towards better language performance and reading skills. Quittner and Steck (1991) also reported that children who were deafened later in life made better use of their implants in everyday listening situations.

Age at diagnosis: The age at which the child's hearing impairment is diagnosed and the child is provided with hearing aids may represent a good marker for the initiation of family training and attention to the hearing loss (Geers and Brenner, 2003). The results of studies by Yoshinaga-Itano (1999, 2000) demonstrate the importance of identification before 6 months of age for subsequent oral language development.

Pre-implant residual hearing: Another important factor to consider is the amount of residual hearing. Children who have more residual hearing, as indexed by pure tone thresholds, usually achieve greater success in speaking than children with less residual hearing (Tye-Murray et al., 1995). It is possible that there is a more "intact" auditory system in these children, which provides a more adequate neural substrate for the electrically induced excitation patterns (El-Hakim, Abdoell, Mount, Papsin, and Harrison, 2002).

Age at implantation: Age at implantation represents one of the most widely researched issues in the field of pediatric cochlear implantation. For prelingually deaf children, biological considerations would suggest that age at implantation is a crucial prognostic variable because of the influence of the early period of sensory deprivation, together with the possible occurrence of "critical periods" in the establishment of auditory mechanisms, including speech understanding and language development (Huttenlocher,

1990). Several recent studies of prelingually deafened children suggest that subjects who receive a cochlear implant at a younger age have better speech skills than those who receive one when they are older (Tye-Murray et al., 1995; Blamey et al., 2001; Geers et al., 2003). For example, El-Hakim et al. (2001) found that children who were implanted after 5 years of age were at a significant disadvantage in terms of expressive and receptive vocabulary acquisition rates after implantation than those who were implanted earlier. These studies reveal that earlier implantation permits children to capitalize upon enhanced brain sensitivity for speech and language development. However, the situation might not be as clear as it seems, for there is considerable individual variation in performance for all implanted children. Moreover, the often-seen positive results of children with early implantation are not consistent for all children within a sample. Finally, the advantage of early implantation over surgery performed later is not uniform. Ertmer et al. (2002), who followed the vocal development of two prelingually deaf children implanted at 10 and 28 months of age, showed that the first child made rapid progress in vocal development, whereas the second developed more slowly. The authors conclude that, despite early implantation, specialized strategies may be required to stimulate speech development.

Bouchard and Cohen (submitted) studied the phonetic and phonological development of 21 prelingually deaf French children who were implanted between 21 and 79 months. These authors also examined the influence of age at implantation on linguistic performance. Their observations with this relatively large sample of subjects revealed that age at implantation influenced neither the rate of acquisition nor the amount of speech produced. Finally, in a study conducted with prelingually deaf children implanted between 1 and 15 years of age, Harrison, Gordon, and Mount (2005) concluded that there is no definite period of deafness after which a cochlear implant is of little or no value for the development of auditory and auditory-related functions, such as speech and language. The authors concluded that there probably is an age at which the brain is maximally plastic for speech development but no specific age after which no progress will be observable. These outcomes suggest that age at implantation may not be the most crucial factor for speech development following implantation. Other factors must also be considered when attempting to predict or explain a child's performance with the device.

Family characteristics

Parental involvement/motivation: The parents' involvement in the child's therapy and educational program has been cited as essential to post-implant linguistic performance (Bertram and Pad, 1995; Cohen and Waltzman, 1995). Spencer (2004) found that personal parental involvement in the process of deciding upon cochlear implantation and the subsequent educational rehabilitation was positively correlated with linguistic development in implanted children. Parental supportiveness and expectations about outcomes are considered increasingly often in the candidacy process for implanting young children (Knutson et al., 1991). Parental participation in the child's rehabilitation program is now considered a prerequisite for implant candidacy by multidisciplinary implant teams (Geers and Brenner, 2003).

Socioeconomic status (SES): SES is often considered in relation to outcomes for children. The results of studies of implanted children have yielded inconsistent results. Higher SES, as determined by parents' income and education, was associated with higher levels of speech/language development in a study by Geers et al. (2003). Since a number of factors may be related to SES, such as educational opportunities, language exposure and experience, and health, it is difficult to determine the extent to which SES contributes to enhanced speech skills. Studies of the relationship between the mother's SES and the quality of mother-child interaction (Hoff-Ginsberg, 1991; Calderon, 2000) indicate that the effects of SES on both mother and child language may be much more intricate and complex than variations in income alone. Both internal (attitude and conversational style) and external circumstances (stress and time constraints) impact on mothers of varying socioeconomic strata differently and may, in turn, influence the diversity and depth of the child's language (see also Le Normand, Parrisé, and Cohen, 2008).

Implant and educational characteristics

Implant characteristics: Cochlear implants themselves may also contribute to the variance seen in language outcome studies. Geers et al. (2002) found that the overall functioning of the implant predicted a significant amount of variance in language/speech

performance. Implant function accounted for more variance than the child, family or rehabilitative factors considered in their study. Children with more active electrodes in their implant map displayed better outcomes. Geers et al. (2002) stressed the importance of replacing older equipment as new technology becomes available. Cochlear implant manufacturers are continuously developing new external processors that are often compatible with older internal implant components. A map with wide dynamic range and good loudness growth helps produce better speech, language and reading outcomes (Geers et al., 2002).

Communication mode: Another frequently mentioned variable that plays a key role is the mode of communication, incorporating signs or gestures as well as listening and speaking (Tobey et al., 2003). It remains unclear how mode of communication enhances or detracts from the development of oral communication skills. The results of studies that have investigated its influence are ambiguous. Indeed, many authors conclude that implanted children raised in strictly oral environments acquire speech faster (Gaul Bouchard, Le Normand and Cohen, 2007; Moog and Geers, 2003; Tobey et al., 2003). Others believe that, even though manual communication does not appear to have a detrimental effect on speech acquisition (Yoshinaga-Itano, 2000), once it is integrated into the communication system of an individual, it will continue to have an impact regardless of the kind of rehabilitation offered post-implantation (Tye-Murray et al., 1995). On a test of both receptive and expressive language ability, Spencer (2004) found that children with performance scores at both the high and low extremes were enrolled in oral communication programs. Children who scored in the mid-range benefited from Total Communication programs, an approach that makes use of a number of modes of communication such as signed, oral, auditory, written and visual aids. These findings appear to indicate that oral communication may be advantageous to some children and deleterious to others. They also suggest that no one method of communication is uniformly appropriate

Conclusion

Cochlear implantation is a major event in the life of a deaf child and it is likely to have a significant impact on his or her cognitive and social development. Although impressive amounts of data have been collected to date, these observations are not always easy to

interpret. This is because every element in this domain of study is constantly evolving, whether we are dealing with the cognitive, social or medical aspects of implantation or with implant mapping technology. Notwithstanding these difficulties, the available data show clearly that cochlear implantation can have a significant impact on the development of speech and language in prelingually deaf children. Implantation may speed up language development but one crucial question remains: whether the initial delays are reversible. So far, this does not seem to be the case. Despite observable progress, receiving a cochlear implant is not the same as being born with normal hearing. In addition, the variability in performance remains quite high, with only limited explanation of the reasons for good and poor outcomes. Performance depends to a great extent on technological features, the educational setting, the family environment and the child's cognitive skills. Above all, and this is probably the quintessence of the whole issue, the developmental path of a child, and not only in linguistic terms, depends largely on her or his natural ability to learn and make sense of the information she or he extracts from the environment.

References

- Allen, C., T. P. Nikolopoulos, and G. M. O'Donoghue. 1998. Speech intelligibility in children after cochlear implantation. *The American Journal of Otology* 19.742-6.
- Archbold, S. M., T. P. Nikolopoulos, M. Tait, G. M. O'Donoghue, M. E. Lutman, and S. Gregory. 2000. Approach to communication, speech perception, and intelligibility after paediatric cochlear implantation. *British Journal of Audiology* 34.254-64.
- Bauer, P., A. E. Geers, C. Brenner, J. S. Moog, and R. J. Smith. 2003. The effect of GJB2 allele variants on performance after cochlear implantation. *The Laryngoscope* 113.2135-40.
- Bertram, B., and D. Pad. 1995. Importance of auditory-verbal education and parents' participation after cochlear implantation of very young children. *Annals of Otology Rhinology and Laryngology* (Suppl.) 166.97-100.
- Blamey, P. J., J. G. Barry, and P. Jacq. 2001. Phonetic inventory development in young cochlear implant users 6 years post-operation. *Journal of Speech, Language and Hearing Research* 44.73-9.
- Bouchard, M.-E., and H. Cohen. Submitted. Evolution of speech in children with cochlear implants.
- Calderon, R. 2000. Parental involvement in deaf children's education programs as a predictor of child's language, early reading, and social-emotional development. *Journal of Deaf Studies and Deaf Education* 5.140-55.
- Chin, S. B. 2003. Children's consonant inventories after extended cochlear implant use. *Journal of Speech Language and Hearing Research* 46.849-62.
- Chin, S. B., and D. B. Pisoni. 2000. A phonological system at two years after cochlear implantation. *Clinical Linguistics and Phonetics* 14.53-73.
- Chin, S. B., P. L. Tsai, and S. Gao. 2003. Connected speech intelligibility of children with cochlear implants and children with normal hearing. *American Journal of Speech Language Pathology* 12.440-51.
- Cohen, N. I., and S. B. Waltzman. 1995. Influence of processing strategies on cochlear implant performance. *Annals of Otology, Rhinology and Laryngology* (Suppl.) 104.165-9.

- El-Hakim, H., M. Abdoell, R. J. Mount, B. C. Papsin, and R. V. Harrison. 2002. Influence of age at implantation and of residual hearing on speech outcome measures after cochlear implantation: Binary partitioning analysis. *Annals of Otology, Rhinology and Laryngology (Suppl.)* 111.102-8.
- Ertmer, D. J. 2001. Emergence of a vowel system in a young cochlear implant recipient. *Journal of Speech, Language and Hearing Research* 44.803-13.
- Ertmer, D. J., K. I. Kirk, S. T. Sehgal, A. I. Riley, and M. J. Osberger. 1997. A comparison of vowel production by children with multichannel cochlear implants or tactile aids: Perceptual evidence. *Ear and Hearing* 18.307-15.
- Ertmer, D. J., and J. A. Mellon. 2001. Beginning to talk at 20 months: Early vocal development in a young cochlear implant recipient. *Journal of Speech and Hearing Research* 44.192-206.
- Ertmer, D. J., L. M. Strong, and N. Sadagopan. 2003. Beginning to communicate after cochlear implantation: Oral language development in a young child. *Journal of Speech, Language and Hearing Research* 46.328-41.
- Ertmer, D. J., N. Young, K. Grohne, J. Mellon, C. Johnson, K. Corbett, and K. Saindon. 2002. Vocal development in young children with cochlear implants: Assessment and implications for intervention. *Language, Speech, and Hearing Services in the Schools* 33.185-96.
- Gaul Bouchard, M.-E., M.-T. Le Normand, and H. Cohen. 2007. Production of consonants by prelingually deaf children with cochlear implants. *Clinical Linguistics and Phonetics* 21. 875-884.
- Geers, A. E. 2006. Factors influencing spoken language outcomes in children following early cochlear implantation. *Advances in Otorhinolaryngology* 64.50-65.
- Geers, A. E., and C. Brenner. 2003. Background and educational characteristics of prelingually deaf children implanted by five years of age. *Ear and Hearing (Suppl.)* 24.2-14.
- Geers, A., C. Brenner, J. Nicholas, R. Uchanski, N. Tye-Murray, and E. Tobey. 2002. Rehabilitation factors contributing to implant benefit in children. *Annals of Otology, Rhinology, and Laryngology (Suppl.)* 189.127-30.

- Geers, A. E., J. S. Nicholas, and A. L. Sedey. 2003. Language skills of children with early cochlear implantation. *Ear and Hearing* (Suppl.) 24.46-58.
- Go, T., M. J. Hamilton, F. M. Rizer, K. A. Schatz, P. N. Arkis, and H. C. Rose. 1998. Early speech changes in children with multichannel cochlear implants. *Otolaryngology – Head and Neck Surgery* 115.508-12.
- Govaerts, P. J., C. De Beukelaer, K. Daemers, G. De Ceulaer, M. Yperman, T. Somers, I. Schatteman, and F. E. Offeciers. 2002. Outcome of cochlear implantation at different ages from 0 to 6 years. *Otology and Neurotology* 23.885-90.
- Harrison, R. V., K. A. Gordon, and R. J. Mount. 2005. Is there a critical period for cochlear implantation in congenitally deaf children? Analyses of hearing and speech perception performance after implantation. *Developmental Psychobiology* 146.252-61.
- Hodges, A. V., and T. J. Balkany. 2002. Cochlear implant for sensorineural hearing loss. *Hospital Physician*, October, 22-8.
- Hoff-Ginsberg, E. 1991. Mother-child conversation in different social classes and communicative settings. *Child Development* 62.782-96.
- Huttenlocher, P. R. 1990. Morphometric study of human cerebral cortex development. *Neuropsychologia* 28.517-27.
- Isaacson, J. E., M. S. Hasenstab, D. L. Wohl, and G. H. Williams. 1996. Learning disability in children with postmeningitic cochlear implants. *Archives Otolaryngology – Head and Neck Surgery* 122.929-36.
- Kirk, K. I., E. Diefendorf, A. Riley, and M. J. Osberger. 1995. Consonant production by children with multichannel cochlear implants or hearing aids. *Advances in Otorhinolaryngology* 50.154-9.
- Kirk, K. I., and C. Hill-Brown. 1985. Speech and language results in children with a cochlear implant. *Ear and Hearing* (Suppl.) 6.36-47.
- Klein, L., L. E. Huerta, and National Library of Medicine (US). 1992. *Early identification of hearing impairment in infants and young children*. Bethesda, MD: US Dept. of Health and Human Services, National Institutes of Health.

- Knutson, J. F., H. A. Schartz, B. J. Gantz, R. S. Tyler, J. V. Hinrichs, and G. Woodworth. 1991. Psychological change following 18 months of cochlear implant use. *Annals of Otology, Rhinology and Laryngology* 100.877-82.
- Le Normand, M.-T., Parrisé, C., and Cohen, H. 2008. Lexical diversity and productivity in French preschoolers: developmental, gender and sociocultural factors. *Clinical Linguistics and Phonetics* 22. 47-58.
- Lesinski, A., R. Hartrampf, M. C. Dahm, B. Bertram, and T. Lenarz. 1995. Cochlear implantation in a population of multihandicapped children. *Annals of Otology, Rhinology, and Laryngology (Suppl.)* 166.332-4.
- Mohammad, J.A., Makhdoum, M., Snik, F.M., van den Broek, P. (1997). Cochlear implantation in deaf children. *Annals of Saudi Medicine* 17. 533-39.
- Miyamoto, R. T., M. Svirsky, K. I. Kirk, A. M. Robbins, S. Todd, and A. I. Riley. 1997. Speech intelligibility of children with multichannel cochlear implants. *Annals of Otorhinolaryngology* 106.35-6.
- Monsen, R. B. 1981. A usable test for the speech intelligibility of deaf talkers. *American Annals of the Deaf* 126.845-52.
- Moog, J. S., and A. E. Geers. 2003. Epilogue: Major findings and conclusions and implications for deaf education. *Ear and Hearing* 24.S121-5.
- Morrison, J. A., and L. D. Shriberg. 1992. Articulation testing versus conversational speech sampling. *Journal of Speech and Hearing Research* 35.259-73.
- O'Donoghue, G. M., T. P. Nikolopoulos, S. M. Archbold, and M. Tait. 1999. Cochlear implants in young children: The relationship between speech perception and speech intelligibility. *Ear and Hearing* 20.419-25.
- Osberger, M. J., M. Maso, and L. S. Sam. 1993. Speech intelligibility of children with cochlear implants, tactile aids, or hearing aids. *Journal of Speech and Hearing Research* 36.186-203.
- Osberger, M.J., Robbins, A.M., Todd, S.L., & Riley, A.I., Miyamoto, R.T. 1994. Speech intelligibility of children with cochlear implants. *Volta Review* 96. 169-180.
- Pisoni, D. B., and M. Cleary. 2003. Measures of working memory span and verbal rehearsal speed in deaf children after cochlear implantation. *Ear and Hearing* 24.S106-20.

- Quittner, A. L., and J. T. Steck. 1991. Predictors of cochlear implant use in children. *The American Journal of Otology (Suppl.)* 12.89-94.
- Rajput, K., T. Brown, and D. Bamiau. 2003. Aetiology of hearing loss and other related factors versus language outcome after cochlear implantation in children. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology* 67.497-504.
- Robbins, A. M., K. I. Kirk, M. J. Osberger, and D. Ertmer. 1995. Speech intelligibility of implanted children. *Annals of Otology, Rhinology and Laryngology (Suppl.)* 104. 399-401.
- Robinshaw H.M. 1996. Acquisition of speech, pre- and post-cochlear implantation: longitudinal studies of a congenitally deaf infant, *European Journal of Disorders of Communication* 31. 121-139
- Samar, V. J., and D. E. Metz. 1988. Criterion validity of speech intelligibility rating-scale procedures for the hearing-impaired population. *Journal of Speech, Language and Hearing Research* 31.307-16.
- Schein, J. D. 1987. The demography of deafness. *Understanding deafness socially*, ed. by P. C. Higgins and J. E. Nash, 12-3. Springfield, IL: Charles C. Thomas.
- Sehgal, S. T., K. I. Kirk, M. Svirsky, D. J. Ertmer, and M. J. Osberger. 1998. Imitative consonant feature production by children with multichannel sensory aids. *Ear and Hearing* 19.72-83.
- Serry, T. A., and P. J. Blamey. 1999. A 4-year investigation into phonetic inventory development in young cochlear implant users. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research* 42.141-54.
- Smith, C. R. 1975. Residual hearing and speech production in deaf children. *Journal of Speech and Hearing Research* 18.795-811.
- Spencer, P. E. 2004. Individual differences in language performance after cochlear implantation at one to three years of age: Child, family, and linguistic factors. *Journal of Deaf Studies and Deaf Education* 9.395-412.
- Teagle, H. F. B., and J. A. Moore. 2002. School-based services for children with cochlear implants. *Language, Speech, and Hearing Services in Schools* 33.162-71.

- Tobey, E., A. Angelette, C. Murchison, J. Nicosia, S. Sprague, S. Staller, J. A. Brimacombe, and A. L. Beiter. 1991. Speech production performance in children with multichannel cochlear implants. *American Journal of Otology (Suppl.)* 12.165-73.
- Tobey, E. A., A. E. Geers, C. Brenner, D. Altuna, and G. Gabbert. 2003. Factors associated with development of speech production skills in children implanted by age five. *Ear and Hearing (Suppl.)* 24.36-45.
- Tobey, E. A., S. Pancamo, S. J. Staller, J. A. Brimacombe, and A. L. Beiter. 1991. Consonant production in children receiving a multichannel cochlear implant. *Ear and Hearing* 12.23-31.
- Tye-Murray, N., and K. I. Kirk. 1993. Vowel and diphthong production by young users of cochlear implants and the relationship between the Phonetic Level Evaluation and spontaneous speech. *Journal of Speech and Hearing Research* 36.488-502.
- Tye-Murray, N., P. E. Spencer, and G. Woodworth. 1995. Acquisition of speech by children who have prolonged cochlear implant experience. *Journal of Speech and Hearing Research* 38.327-37.
- Yoshinaga-Itano, C. 1999. Early identification: An opportunity and challenge for audiology. *Seminars in Hearing* 20.317-30.
- Yoshinaga-Itano, C. 2000. Development of audition and speech: Implication for early intervention with infants who are deaf or hard of hearing. *The Volta Review (monograph)* 100.213-34.

2.2 ARTICLE 2

Evolution of speech in children with cochlear implants

Marie-Eve Gaul Bouchard and Henri Cohen^o

Soumis *Clinical Linguistics and Phonetics*

EVOLUTION OF SPEECH IN CHILDREN WITH COCHLEAR IMPLANTS

Marie-Eve Gaul Bouchard* and Henri Cohen°

*: Cognitive Neuroscience Centre, Université du Québec à Montréal, Montréal,
Québec, Canada

°: Psychology and Cognitive Neuroscience Laboratory, Université Paris Descartes-
CNRS, France

We thank Dr. Marie-Thérèse Le Normand for giving us access to the children in this study. This research was aided by grants from SSHRC (Ottawa) and FQRSC (Québec). Address request for reprints to M-E Gaul Bouchard (marie_eve_bouchard_2001@hotmail.com) or to H. Cohen (henri.cohen@univ-paris5.fr)

Évolution de la parole d'enfants avec implants cochléaires

Résumé

21 enfants français atteints de surdité pré-linguistique ont participé à cette étude ayant pour principal objectif d'examiner les productions de parole à la suite de la mise en marche de la prothèse cochléaire ainsi que l'influence de l'âge à l'implantation sur les performances linguistiques. Les productions de parole spontanée ont été filmées et enregistrées 6, 12, et 18 mois post-chirurgie. Des inventaires de parole ont été obtenus en faisant la liste de tous les segments de type vocalique et consonantique. Les résultats ont démontré des progrès manifestes dès 6 mois post-implantation. Tout au long de l'étude, la précision articulatoire s'est améliorée. Tant pour les voyelles que pour les consonnes, la visibilité des phonèmes semblent avoir influencé l'ordre d'acquisition dans les premiers mois suivant la chirurgie, mais les patrons de développement se sont graduellement normalisés à mesure que ne s'est accrue l'expérience avec la rétroaction auditive. Les résultats suggèrent également que l'âge à l'implantation pourrait ne pas s'avérer le facteur le plus crucial pour expliquer les améliorations post-implantation et qu'une perspective considérant les variables perceptuelles, cognitives et linguistiques représenterait sans doute une avenue plus prometteuse pour expliquer la variabilité fréquemment observée.

Evolution of speech in children with cochlear implants

Abstract

Twenty-one prelingually deaf French children participated in this study examining speech production following cochlear implantation as well as the influence of age at implantation on linguistic performance. Spontaneous speech productions were video- and audio-recorded at 6, 12, and 18 months post-surgery. Speech inventories were obtained by listing all vowel- and consonant-like utterances. The results showed that children initiated appropriate speech production as early as 6 months post-implantation. Speech accuracy improved over the duration of the study. For both types of phonemes, visibility appeared to influence the order of acquisition in the first months following the implantation, but as experience with auditory feedback increased, development patterns tended to resemble those seen in children with normal hearing. The results also showed that age at implantation influenced neither the rate of acquisition nor the amount of speech produced. These outcomes suggest that age at implantation may not be the most crucial factor affecting speech development post-implantation and that considering performance in light of perceptual, cognitive and linguistic issues may represent a promising avenue to achieve more powerful explanations for the varied performance frequently observed.

Introduction

Auditory input is known to play a role in both the acquisition of phonemes and the capacity to produce them (Goffman, Ertmer, & Erdle, 2002). Children who suffer from severe deafness cannot rely on auditory input since this information is absent, reduced or disrupted. As a result, prelingually deaf children (PDC) present major language delays, a broad range of abnormal speech behaviours and major difficulties when they attempt to make themselves understood orally by other people (Markides, 1970; O'Donoghue, Nikolopoulos, Archbold, & Tait, 1999). Cochlear implants allow the surviving cells in the auditory pathways to be stimulated in some hearing-impaired (HI) children (Sharma, Spahr, Dorman, & Todd, 2002). Bypassing the hair cells of the inner ear, the implant can directly stimulate the cochlear nerve and contribute to the development of the auditory cortex. The electrode-stimulation pattern is closely related to environmental acoustic signals, with a particular emphasis on coding the information contained in speech sounds. Most authors agree that this acoustic stimulation do not completely restore normal sensory sensation but does provide sufficient acoustic cues to allow basic speech perception. Consequently, it is believed that the use of cochlear implants, in combination with rehabilitative therapy, should significantly help profoundly deaf children to develop speech and participate in aural-oral communication (Robinshaw, 1996).

A growing body of literature has shown that this sensory restoration assists in the acquisition of several speech components such as suprasegmental features (Tye-Murray, Spencer, & Woodworth, 1995), vowels (Ertmer, Kirk, Sehgal, Riley, & Osberger, 1997) and consonants (Grogan, Barker, Dettman, & Blamey, 1999), as well as intelligibility (Osberger, Maso, & Sam, 1993) and conversational abilities (Tobey, Geers, Brenner, Altuna, & Gabbert, 2003).

Despite these improvements in both global and discrete features of oral communication in implanted children, interindividual variability remains a key feature (Tobey et al., 2003). All measures of oral speech communication skills seem to be characterized by a wide range of performance levels. Age at implantation represents one of the most widely researched issues in the field of paediatric cochlear implantation. It is usually

reported that the earlier a child is implanted, the better his or her chances for good language recognition and production will be (e.g., Connor, Hieber, Arts, & Zwolan, 2000; Fryauf-Bertschy, Tyler, Kelsay, Gantz, & Woodworth, 1997). The factors related to critical period for language development, greater neural plasticity in infancy and decreased cross-modal recruitment of the auditory cortex by the visual and somatosensory systems are generally claimed to account for these results. For example, Hammes et al. (2002) showed that, after the age of 30 months, a child's capacity to make the transition from manual to oral communication is significantly diminished. In another study, Schorr, Fox, van Wassenhove, and Knudsen (2005) showed that children implanted after 30 months of age were not able to acquire strong and consistent bimodal fusion of speech. Tye-Murray et al. (1995) compared paediatric cochlear implant users' scores on a variety of speech production tasks and found that children implanted before the age of 60 months had significantly more accurate speech production than children implanted later. The age at which a child undergoes cochlear implantation has also been noted to affect other language outcomes: children implanted before the age of 60 months have significantly higher expressive and receptive vocabulary scores (Connor et al., 2000), higher nonverbal reasoning scores (Geers et al., 2002) and better reading skills (Geers, 2002) than children implanted after that age. Svirsky, Robbins, Kirk, Pisoni, and Miyamoto (2000) developed a predictive growth model to measure the growth of expressive and receptive language in paediatric cochlear implant recipients before and after implantation. This model incorporated both observed and predictive scores for each child, that is, the estimated language score that the participants would have obtained if they had never received cochlear implants. Using this model, the authors showed that children implanted at or before 54 months of age experienced language development comparable to that of children with normal hearing. Thus, 30 months and 54 months of age appear to represent milestones in the language development of implanted children.

These observations suggest that earlier implantation permits children to capitalize upon their enhanced brain sensitivity for speech and language development. However, the situation may not be as clear as it seems. Huttenlocher (1990) showed that developmental changes in language-related cortical areas continue to take place until adolescence. Chin, Tsai, and Gao (2003) also reported that progress in linguistic skills occurred in implanted

individuals aged more than 11 years old and with more than 6 years of implant experience. Finally, the majority of studies conducted with implanted children have had certain limitations, which restrict the scope of their conclusions.

First of all, in speech production studies with cochlear implant children, experienced listeners are usually asked to transcribe productions or judge them for accuracy in relation to a specific target. In most cases, these investigations focus on a single point in time post-implantation, or select an initial assessment period soon after the activation of the device and a second one after years of experience with it, so that significant changes are likely to be observed. Although useful for examining linguistic progress, such studies do not document gradual developmental changes.

Another limitation on these studies is related to the types of speech samples used. A variety of speech tasks may be used in evaluating speech and language proficiency, including imitative tasks, standard articulation tests and spontaneous speaking (Tye-Murray & Kirk, 1993). Although the first two task types allow greater homogeneity and control over the data collected, they seldom reflect the child's functional speech or everyday communication skills. In contrast, measures of production collected from spontaneous speech samples usually yield results that are more representative of the child's productive capacities since they do not depend on imitation. In addition, they offer a window on the child's integration of various features of speech and language (e.g., Morrison & Shriberg, 1992). However, findings from this second type of procedure are more difficult to interpret in the case of children with poor intelligibility, such as deaf children (Samar & Metz, 1991). Therefore, control over the accuracy of the production in relation to a speech target is necessary if linguistic value is to be attributed to transcribed utterances. In addition, most studies to date have examined only one or a few children. Although they are highly informative, such small sample sizes make it difficult to generalize the findings across the population of implanted children.

Many studies have employed retrospective designs, which resulted in inconsistent and incomplete language measures (El-Hakim et al., 2001). Finally, in most studies there is no comparison with patterns of development considered to be typical. Yet many authors

consider that normal development represents a crucial foundation for the investigation of speech acquisition in atypical populations (Ingram, 1976).

Based on the results and the methodological limitations described above, it is clear that the influence of age at implantation on speech production must be further investigated. A first step in doing this is to gain a better knowledge of speech development in normally hearing children.

Vowel and consonant acquisition in normally hearing children

Vowels are usually the first speech sounds to emerge in an infant's phonetic repertoire and are known to play an important role in her or his first attempt to communicate orally (Ertmer & Mellon, 2001). In contrast to the extensive literature on consonant development (Dyson, 1988; Ingram, 1981; Stoel-Gammon, 1985, 1987), data on the acquisition of vowels are more limited. Most researchers have paid scant attention to these phonemes, probably because vowels are usually produced more accurately than consonants (Stoel-Gammon & Herrington, 1990). Previous studies of vowel acquisition (e.g., Paschall, 1983; Stoel-Gammon & Herrington, 1990) have reported phonetic inventories derived from phonetic transcriptions. In these studies, only vowels produced in identifiable productions were considered. However, the vocalizations of young children often contain non-glossable, but phonetically transcribable productions (Oller & Eilers, 1975). Moreover, the anatomy of the vocal tract in younger children is noticeably different from that of older children and adults. By restricting vowel analysis to glossable forms only, researchers have principally depicted phonological competence, while neglecting the significance of articulatory skills (Davis & MacNeilage, 1990; Kent & Bauer, 1985). With this in mind, Selby, Robb, and Gilbert (2000) reported all the phonetically transcribable vocalizations of four children between 15 and 36 months of age. Their results were compared to Stoel-Gammon and Herrington's (1990) inventories based on glossable utterances only. Selby et al. (2000) showed that their own analysis yielded a greater variety of vowel types, and that children were able to produce more vowels at an earlier age.

Using the Child Language Data Exchange System (CHILDES) database,

Brosda (1998, 1999) analysed the most frequently produced vowels in the repertoire of French children aged 7 to 18 months. As early as seven months, the front and central open and mid-open vowels were the most regularly observed. Between 9 and 14 months of age, central and closed front vowels were produced equally often. The production of back phones increased between 15 and 18 months of age. Another study of French children, by Lalevée (2003), observed similar trends.

In light of previous studies, some general broad tendencies for vowel acquisition in normally hearing (NH) children can be sketched out. First, the major developmental period occurs prior to three years of age. Regarding tongue place, central vowels are produced first, followed by anterior and posterior vowels. With respect to jaw opening, open and mid-open precede mid-closed and closed vowels, respectively. Finally, nasal vowels are the last to emerge, between 18 and 36 months (Ingram, 1976).

The emergence of consonants in the prelinguistic vocalization of NH infants has been studied extensively. Stoel-Gammon and Cooper (1984) tallied the phones produced in glossable utterances by children aged between 10 and 20 months. Their consonant inventories were mainly composed of stops, nasals, and glides. Fricatives were seldom observed and liquids were absent. Between 21 and 24 months, the range of phones expanded to include voiced and voiceless velar as well as voiceless fricatives. Despite this increase with age, at 24 months, the children's inventories were still incomplete when compared with the adult system (Stoel-Gammon, 1985). To find out whether some of the segments that were reported to be still missing at two years of age would gradually emerge in the subsequent months, Dyson (1988) followed the consonant acquisition of 20 children between 24 and 36 months of age. As suspected, during this period, children were gradually filling in the gap in the phonetic inventory except for [dʒ], as well as the fricatives [θ], [ð], which remained absent.

As Selby et al. (2000) did with vowels, Robb and Bleile (1994) analysed the consonants found in both glossable and non-glossable productions by children aged 8 to 25 months. Though highly similar with respect to general trends of acquisition, the inclusion of

all of the children's transcribable productions provided a broader vocalization sample that revealed consonant types that were only found less often and later in their glossable speech.

Maturation is known to play a role in the development of children's vocal production. However, the results of several studies suggest that from about 1.5 years on, babbling gradually drifts in the direction of the target language that the infant is exposed to in his or her environment (Boysson-Bardies, 1999). Boysson-Bardies, Sagart, and Bacri (1980) analysed and compared the late babbling production of French children aged 18 to 20 months with the production of English-speaking children. Despite several similarities with English, such as the predominance of anterior consonants over more posterior ones, the inventories they obtained presented noticeable disparities that the authors ascribed to the differences between French and English. One difference is related to the production of fricatives, which approximates the frequencies observed in French: almost as many fricatives as stops. A second one concerned voicing ratios among stops and fricatives, which presented a typical French preference for voiced fricatives and unvoiced stops.

These results suggest that there is no single universal order for the acquisition of consonants (Dinnsen, Chin, & Elbert, 1992; Ferguson, 1978). However, some developmental trends characterize both the phonetic and phonological development of this class of phonemes regardless of the targeted language. Thus, with respect to manner of articulation, stops, glides, and nasals are the first to emerge, followed by fricatives and liquids. For place of articulation, consonants produced in the front of the oral cavity precede the posterior ones. Finally, consonant development appears to be inconsistent with respect to the voicing feature.

Vowel and consonant development in deaf children before and after cochlear implantation

Several investigations have shown how deafness impacts on infants' speech production, both quantitatively and qualitatively. HI children babble less (Maskarinec, Cairns, Butterfield, & Weamer, 1981; Mavilya, 1972), enter the stage of canonical babbling later than their NH peers (Oller, 1986; Oller, Eilers, Bull, & Carney, 1985) and produce fewer multisyllabic consonant-vowel strings (Kent, Osberger, Netsell, & Goldschmidt Hustedde, 1987; Stoel-Gammon & Otomo, 1986).

Because the acoustic features of the first two formants (F1, F2) of vowels are mainly located in the low frequencies, this class of phonemes is the most readily perceived by profoundly deaf children. Nevertheless, their production differs from the speech of NH children (Nober, 1967; Smith, 1975). For example, vowels requiring mid or high tongue positions are affected more than those produced with a low tongue height (Geffner, 1980). Acoustically, a limited use of the vowel space is observed, with a greater production of central vowels (Lach, Ling, Ling, & Ship, 1970; Osberger & McGarr, 1982).

Several studies have reported a rapid improvement in the use of vowels following cochlear implantation (e.g., Ertmer & Mellon, 2001; Grogan et al., 1999). Using samples of spontaneous speech production, Tye-Murray and Kirk (1993) assessed the vowels and diphthongs of eight children at 6, 12, 18 and 24 or 36 months post-surgery. With rigorous phone classification distinguishing between phones with known versus unknown targets, their observations revealed that 24 months after the surgery, the children produced a diverse repertoire of vowels and diphthongs. They also showed a significant improvement in their subjects' ability to produce vowels or diphthongs that were the same as the intended targets. Central and front vowels were the most frequently produced although the proportion of back vowels increased steadily throughout the duration of the study.

A study by Serry and Blamey (1999) investigated the phonetic development of nine PDC implanted before age 5. Their results showed that vocalic monophthongs were the first to emerge. They were also the phones with the fastest rate of acquisition.

Finally, with respect to vowel accuracy, Ertmer et al. (1997) found that the 10 implanted PDC they studied were able to imitate vowel place and height features and diphthongs very accurately, after an average of 20 months of implant experience. Their results showed that posterior vowels were produced with greater accuracy both before and after implantation. Following the sensory restoration, there was a marked improvement in the quality of the closed front vowels. Similar results were obtained by Tobey, Geers, and Brenner (1994), who studied vowel production in 13 prelinguistically deaf children who had

also received cochlear implants.

In contrast to their normally hearing peers, the consonant inventories of hearing impaired children are smaller and remain stable or decrease with age (Stoel-Gammon & Otomo, 1986). Qualitatively, hearing impaired children produce more labial consonants because of the visual cues associated with the production of this type of consonant (Dodd, 1976; Smith, 1975; Stoel-Gammon, 1988). They also favour non-syllabic, prolongable consonants such as nasals, fricatives, glides and liquids because of their tactile and kinaesthetic components (Lach et al., 1970; Stoel-Gammon, 1988). Thus, in the absence of auditory cues, extra-auditory factors appear to influence the nature of the phonetic repertoire in HI children. Deafness also impacts on consonant accuracy. Fricatives and liquids are more affected than nasals, stops and glides (Markides, 1970). Posterior consonants are produced less accurately, probably because there is no visual component associated with them (Gold, 1970; Lach et al., 1970; Smith, 1975), and voicing errors have also been observed (Markides, 1970; Nober, 1967; Smith, 1975).

The acquisition of consonants by hearing impaired children following their auditory restoration has also been studied. Ertmer and Mellon (2001) reported on the evolution of the consonants produced by one child during the first 12 months following cochlear surgery. They noted an influence of visual cues, as reflected by the large proportion of labials early on, followed by the gradual emergence of less visible places of articulation. These observations suggest that the now available acoustic information was progressively used by this child to monitor her speech and diversify her production.

A study by Tobey, Pancamo, Staller, Brimacombe, and Beiter (1991) of 29 hearing impaired children reported an increase in consonant production after one year of implant use. Stops and nasals, as well as the more visible places of articulation, were the most frequently produced consonants. Smith (1975) reported similar patterns of acquisition with deaf children wearing conventional hearing aids.

As they did with vowels, Serry and Blamey (1999) and Blamey, Barry, and Jacq (2001) also examined the phonetic and phonological development of consonants. Their results showed that the process of phone acquisition by implanted children was systematic but slower than would be expected in normally-hearing children.

With respect to speech accuracy, Sehgal, Kirk, Svirsky, Ertmer, and Osberger (1998) compared the quality of consonants produced by a group of implanted children and children wearing tactile aids. Although comparable at baseline, the two groups' productions were significantly different after 18 months of experience with their respective devices. Whereas quality of production on all three consonant features improved with cochlear implants, the group with vibrotactile aids experienced no such change during the same period. The authors concluded that consonant features were more effectively transmitted by electrical stimulation of the auditory nerve than by tactile stimulation delivered on the skin. Tye-Murray et al. (1995) studied errors in consonant production made by hearing-impaired children, implanted between 31 and 170 months of age, who had an average of 36 months of auditory experience. They found that stops and nasals were accurately produced and so were consonants that are produced with visible articulatory movements.

Earlier studies of the speech development of children following implantation clearly showed that these children make use of their new auditory information to develop their phonetic inventory. Their articulation also becomes more accurate with acoustic feedback. Nevertheless, they develop more slowly than normally-hearing children generally do and rarely produce certain phonetic targets such as nasal vowels and fricative consonants.

Objectives of the study

Our investigation pursued two main objectives. The first one was to determine the extent to which the acquisition patterns of a group of implanted children correspond to those of their normally-hearing peers. The second was to investigate how age at implantation influences both the pattern and the rate of expressive capacities.

Method

Participants

The participants in this study were 21 prelingually deaf French children, 10 girls and 11 boys, all of whom received a multichannel cochlear implant. The socio-demographic and clinical characteristics of the subjects are presented in Table 1. They all underwent complete audiological, neurological and linguistic evaluations prior to receiving the cochlear implant. The participants were selected from a larger sample of 50 children who were followed at one of four French hospitals in Montpellier, Lyon, Toulouse and Paris. The only criteria for exclusion were the presence of a disability other than deafness and the absence of speech production at any of the three assessment periods. All participants were Total Communication users, that is, they lived in a home environment that principally used oral language, although communicative support such as cued speech, Signed French (SF) and French Sign Language (FSL) was made available to them when necessary. Preoperative hearing loss in the better ear was expressed as a pure-tone average (PTA) threshold at frequencies of 500, 1000 and 2000 Hz in dB of hearing loss (HL).

Insert Table 1 about here

Cochlear implants and strategies. All but three of the subjects were implanted with the multichannel Nucleus CI24M, manufactured by Cochlear Corporation. Two different speech strategies were utilized: spectral peak (SPEAK) and Continuous Interleaved Sampling (CIS). Children number 13, 16, and 18 were implanted with the Clarion multichannel cochlear implant manufactured by Advanced Bionics Corporation and used the CIS strategy.

Rehabilitation. All children in the study were enrolled in auditory rehabilitation programs. Their implants were fine-tuned regularly to ensure optimal access to acoustic information. Rehabilitation consisted of individual sessions of approximately one hour, from the time hearing loss was diagnosed through the post-operative period. The frequency of the sessions decreased from weekly to monthly as time progressed. Parents and relatives usually attended these sessions and were also instructed on how to optimize the use of audition and oral communication in their interactions with the child.

Procedure

Assessments were conducted at 6, 12 and 18 months post-implantation. Twenty-minute speech samples were video- and audio-taped by clinicians. The samples were obtained by involving the child in a standardized free-play session with one parent and a familiar speech therapist. The set-up included Fisher-Price toys, a house and figurines, as well as replicas of household items. During the narrative procedure, children were asked to verbalize about as many manipulations and actions as possible with toys and objects in and around the house.

Following Dale (1991, 1996), speech skills (production and comprehension) prior to implantation were evaluated with a questionnaire, completed by both the parents and the speech therapist, which required listing and recognizing words and phonemes that were produced and perceived by the children in everyday situations. Word comprehension was scored on a 0 (none) to 5 (consistent identification of words in sentences) point scale and speech production was expressed on a 0 (none) to 5 (a few isolated words) point scale. Prior to the implantation, the majority of children produced the vowels /a/, /e/, /i/ and the consonants /m/, /p/, /l/.

Transcriptions.

Broad transcription of speech utterances was adopted following Shriberg and Lof (1991). Three transcribers completed transcriptions from the audiovisual recordings. Two were graduate students in linguistics, who were experienced with the speech of deaf talkers. The third transcriber, fluent in both SF and FSL, transcribed all of the speech productions in order to take into account the portions of the samples containing forms of manual communication.

Both glossable and non-glossable utterances were transcribed. Crying, laughter and vegetative sounds were not considered in the transcriptions. An utterance was defined as a vocalization or group of vocalizations separated from all others by either audible ingressive breaths or a judge's intuition about utterance boundaries—sometimes indicated by a silence

1 s or longer in duration (e.g., Lynch, Oller, & Steffens, 1989). Videotapes were used to clarify the source of ambiguous recorded sounds, to assist in identifying articulator involvement as needed and to reference spoken messages to the concomitant signed messages. Speech samples were transcribed using the symbols of the International Phonetic Association (IPA) notation system and formatted in accordance with the Codes for the Human Analysis of Transcripts (CHAT) transcription conventions of the CHILDES (MacWhinney, 2000). Since not all children are equally talkative, the transcriptions were limited to the first 100 intelligible words of each sample. Table 2 shows the number of utterances selected for each child, at the 6-, 12-, and 18-month assessments.

Insert Table 2 about here

Agreement between phonetic transcriptions.

Point-by-point comparisons of the transcriptions were carried out. Disagreements were resolved by the third transcriber in order to achieve a 2/3 agreement. The average inter-rater agreement was over 98% for the 63 speech samples transcribed (21 participants x 3 sessions). The remaining 2% was not taken into account.

Linguistic analyses

Phone classification. All the transcribed phones were divided into two categories: linguistic and non-linguistic. Two measures were derived for linguistic segments, following Tye-Murray and Kirk (1993): *total number of spoken sounds* referred to the number of times each sound was spoken in a word context, whether or not it was the intended target sound; *correct production* referred to the number of times a spoken sound matched the intended target, as indicated by the corresponding sign or by intelligible utterances. For non-linguistic production, the *total production* (TP) referred to the number of times a spoken phone was produced, whether in a linguistic or a non-linguistic utterance.

Acquisition criteria. Following Blamey et al. (2001) and Serry and Blamey (1999), two criteria, the *targetless* and *target* criteria, were used to define and identify two endpoints in the development of phonemes. The targetless criterion required that at least two tokens of a

phone be found in the total production class. The target criterion only counted phones in the linguistic category, requiring at least two occurrences of a phone in the total number of spoken sounds; at least 50% of these attempts had to be correct. These criteria allowed us to determine when a phoneme had been mastered phonetically (targetless) and phonologically (target). Group data were computed in order to reveal developmental trends over the study period. The criterion for group acquisition of a particular phone required that 11 out of the 21 participants must have reached the targetless or target criteria.

Results

Vowel and consonant inventories

Throughout the duration of the study, /a/ was the most frequently produced vowel, while nasals showed little progress. Regarding place, central vowels remained the most frequently produced vocalic class, while back vowels were produced least often, although their use increased steadily throughout the study. As for height, at every assessment period, open vowels were the most frequently produced. Despite the gradual emergence of phonemes in the inventories, the proportions of closed, mid-closed and mid-open vowels remained the same, representing approximately 20% of the total vowel production. Finally, unrounded vowels were produced at rates ranging between 70% and 80% throughout the study.

With respect to consonants, although their frequency decreased steadily, [p, b, m] remained the most widely used. Conversely, [ɥ, ŋ, z, ʒ] represented the least frequently produced consonants. [t, s, r, w] increased steadily over the duration of the study. Regarding manner of articulation, stops represented the most frequently produced class of consonants, accounting for 55% of production 6 months post-implantation, and 45% at the 18-month assessment. With respect to place of articulation, labials were the most frequently produced. Alveolars represented the class of consonants that increased the most. Finally, the proportions of palatal and velar/uvular consonants remained constant throughout the study, representing 8% and 12% of the total production, respectively.

Phonetic and phonological development

For vowels, it was observed that phonetic and phonological development occurred almost simultaneously: when a phone was mastered, it either met both criteria at the same time or there were only 6 months between the achievement of the first and second criteria. As early as 6 months post-implantation, [i, a], and [e] had met both criteria. All the other vowels were gradually mastered and integrated into linguistic utterances except [œ], which satisfied neither of the two criteria at the 18-month assessment.

The discrepancy between phonetic and phonological acquisition was greater for consonants. Usually, it took at least 12 months for a phone to be mastered phonologically once it had been produced phonetically. At 6 months post-implantation, [m, p] were already acquired according to both criteria. During this one-and-a-half-year period, 13 consonants reached the EP (phonetic) and AP (phonological) targets. [g, v] attained the first criterion, whereas [f, ʒ, z, ʧ, ɲ] had not met either target yet.

Speech errors

The phoneme productions of the 21 subjects were further assessed for accuracy of production and whether or not the speech errors were influenced by increasing experience with auditory sensation. For vowels, confusion matrices showed relatively good speech production (accuracy between 39% and 92%). Central vowels were the most accurate (over 90%). Conversely, nasals were the least accurate (accuracy between 38.5% and 66%). Table 3 presents the percentages of unrounded front, rounded front, central, rounded back, and nasal vowels produced for each target vowel category at the 6-, 12-, and 18-month assessments.

Insert Table 3 about here

For consonants, the confusion matrices showed that as early as 6 months post-implantation, speech production was relatively good, with accuracy ranging between 64.3% for fricatives and 95.4% for stops. Despite constant improvement, fricatives remained the least accurately produced sounds, throughout the study period. When substituted, consonants

of any class were generally replaced by a stop consonant. Table 4 presents the percentages of stops, fricatives, liquids and glides produced for each target consonant category at the 6-, 12-, and 18-month assessments.

Insert Table 4 about here

Rate of development

Slopes were computed in order to look at the rate of change over time for the different phone criteria. For vowels, slopes ranged between 0.25 and 9.83 ($M = 3.45$, $SD = 3.27$) for *Total number of spoken words*, between 0.33 and 9.08 ($M = 3.36$, $SD = 2.70$) for *Correct production* and between -0.83 and 8.25 ($M = 3.40$, $SD = 3.25$) for *Total production*. Results for consonants ranged between 0.25 and 17.10 ($M = 4.28$, $SD = 4.32$) for *Total number of spoken words*, between 0.67 and 11.33 ($M = 3.30$, $SD = 2.84$) for *Correct production*, and finally between -4.25 and 12.67 ($M = 3.46$, $SD = 3.77$) for *Total production*. These results showed that progression was greater for consonants. For both vowels and consonants, the only negative slope values were observed for the *Total production* category, which included glossable as well as non-glossable production.

Influence of age at implantation on the development rate

In the first level of analysis, Pearson correlations were used to examine the influence of age at implantation. At this preliminary level, this analysis was chosen over the t-test in order to avoid creating groups on the basis of the median age at implantation, which may result in questionable group divisions. None of the phoneme criteria led to statistically significant correlation coefficients. Scatter-plot graphs were observed to ensure that neither floor nor ceiling effects had invalidated the correlation obtained. This first series of analyses suggested that there was no significant relationship between the rate of acquisition and the age at implantation.

To further analyse the possible influence of age at implantation on the rate of acquisition, Student's t-tests were computed on the slopes for the different phoneme categories (*Total number of spoken words*, *Correct production* and *Total production*). This

time, participants were divided into two groups based on their age at implantation. Following Hammes et al. (2002) and Svirsky et al. (2000), children implanted before 30 months of age ($M = 27.25$, $SD = 1.5$) were grouped together and labelled as 'implanted early'. Conversely, children implanted after 54 months of age ($M = 67$, $SD = 10.03$) were considered as being 'implanted late'. This division allows us to clearly differentiate the two groups, because in child development, 20 months represents a huge amount of time. None of the t-tests turned out to be statistically significant, suggesting that children were adding phonemes to the various criteria at the same rate, independently of the time at which they were implanted.

Influence of age at implantation on speech production.

Finally, 2 (early and late implantation) \times 3 (6, 12, 18 months post-implantation) ANOVAs with repeated measures on the first factor were computed. An alpha level of .05 was used for all statistical tests. As seen in Table 5, significant main effects of time were observed for every phoneme category, suggesting that production increased for both groups independently of their age at implantation. Interaction effects were also found to be significant for the Consonant – Total production category ($F(2,12) = 5.23$, $p = .02$). Post hoc analysis of this interaction revealed a significant simple effect of time for the group of children implanted early, indicating that this group's total consonant production changed significantly over time, as opposed to the group of children implanted later, whose results for this criterion did not change significantly. The results of the ANOVAs for the different speech production categories are presented in Table 5

Insert Table 5 about here

Discussion

This study investigated the phonetic and phonological aspects of speech development in a group of prelingually deaf French children over the first 18 months following cochlear implantation. Two main objectives were pursued: to determine the extent to which the acquisition patterns of a group of implanted children can be compared to those of normally hearing children and to investigate whether age at implantation

affects both productive capacities and rate of acquisition.

Our results revealed three key findings. First, once auditory experience was partially reintroduced, phoneme production emerged quite rapidly; the pattern of development resembled that observed in NH children. Second, speech accuracy was relatively good as early as 6 months post-implantation and continued to improve throughout the time of the study. Finally, age at implantation did not differentiate the expressive capacities of the implanted children.

The data revealed that progress in phoneme production occurred over a relatively short time following the sensory restoration. In addition, the observed acquisition pattern paralleled in many ways those reported for the children's NH peers. For example, the number of central phones in the speech of the children in this study is similar to what is typically produced in the emerging speech of NH children, where central vowels gradually evolve towards more peripheral ones (Kent & Murray, 1982). An expansion of the vocalic space was also noticed, with increased production of anterior and posterior vowels at 12 and 18 months post-implantation. Improved access to high-frequency F2 cues probably accounts for the progress in anterior vowels (e.g., Tye-Murray & Kirk, 1993). Nasal phones are usually the last vowels to be produced by NH children (Kent, 1992), and this tendency was observed here. A resemblance to NH children's acquisition patterns was also observed for consonants. The dominance of stops is in marked contrast to several studies conducted with HI children, who favoured fricatives and glides and seldom produced stops (Lach et al., 1970; Stoel-Gammon, 1988). Pre-implantation factors such as early diagnosis of the hearing impairment and consistent use of amplification devices may have helped some of these children to develop a phonetic repertoire more like that of their NH counterparts (Ertmer & Mellon, 2001; Kent et al., 1987). In addition, the children in this investigation produced more anterior consonants than those in other studies.

However, gaining access to acoustic information following a period of sensory deprivation is accompanied by distinctive developmental events. The back vowel /u/, seen as early as 6 months post-implantation, is rather rare in the early speech of typically developing

children (Brosda, 1998; Kent & Bauer, 1985). The visual cues it provides, combined with its acoustic characteristics, located in the low frequencies, may have made this phone available prior to the sensory restoration. Phoneme visibility was also observed to influence consonant production: labials, which are highly visible, always ranked among the highest in production rates. They were followed by alveolars, velars/uvulars and palatals. This order, which almost simulates a rank order of consonant visibility, corroborates the results of other investigations of HI children with cochlear implants (Ertmer & Mellon, 2001; Grogan et al., 1999) or with conventional hearing aids (Smith, 1975).

The use of tactile and kinaesthetic cues, a second extra-auditory signal, was also observed in the early emergence of the phoneme /l/ prior to implantation and, to a lesser extent, of /r/ following the surgery. While these two liquids are usually not among the earliest consonants produced and represent difficult phonological targets for NH children (Kent, 1992; Pendergast et al., 1966; Sander, 1972), they were acquired rather early by the implanted subjects. It is possible that the unique ways of blocking the air passage that are required to generate these two phonemes may have helped these children to acquire them earlier than their NH peers. The acoustic quality of these phonemes, characterized by low frequencies and formant transitions (Borden, Harris, & Raphael, 2002), may also have favoured their early emergence.

Though useful, these alternative cues are insufficient to transmit all of the information necessary for the perception and production of the full consonant inventory (Kuhl & Meltzoff, 1984). The emergence of less visible phones such as mid-open/closed vowels and velar/uvular consonants, as well as high-frequency and motorically more complex fricatives, suggests a more sustained reliance on acoustic signals. This increase in the use of acoustic cues with implant experience was also reported by Ertmer and Mellon (2001) and Grogan et al. (1999). Thus, with respect to speech production, the results of our investigation suggest that, as experience with auditory information grows, patterns of development become more similar to those seen in NH children.

Phonetic and phonological development

Phonetic and phonological development was tracked by the use of two acquisition criteria: the targetless and target phones. Our results showed that unlike NH children, who generally produce a phone phonetically prior to using it phonologically, implanted children tended to produce vowels in both contexts almost simultaneously. Auditory experience and speech rehabilitation prior to the auditory restoration may account for this result. On the other hand, consonant acquisition patterns were more similar to those observed in NH children, with phonetic acquisition preceding phonological mastery. This use of two criteria enabled us to highlight these children's linguistic progress. Only slopes for the *Total production* criterion, which includes non-linguistic production, were negative. This result suggests that these children gained more and more control over their vocal productions so that they could integrate them in linguistic contexts. Selby et al. (2000) insisted on the importance of taking into consideration both glossable and non-glossable utterances, specifically in the case of children with unintelligible speech or limited expressive abilities, in order to be able to examine their speech proficiency more objectively.

Speech errors

Analysis of the speech errors suggested that overall accuracy in phoneme production was relatively good. Throughout the duration of the study, correct production or substitution of phonemes by others within the same category increased across the majority of phonemic classes. This rapid improvement showed that these children did not have significant difficulties overcoming any previously learned maladaptive speech production strategies. These results contrast with those reported by Smith (1975) and McGarr (1987) with profoundly deaf children using conventional hearing aids. Increased auditory access probably allows implanted children to perceive phone contrasts more accurately and thus to refine their articulatory strategies. On the whole, then, the results of this investigation showed that speech development following partial access to acoustic information post-implantation proceeds in a unique way that combines trends observed in NH children with patterns usually reported in HI children with conventional hearing aids.

Influence of age at implantation

Our results are in line with those obtained by Ertmer et al. (2002), who followed the vocal development of two PDC implanted at 10 and 28 months of age. They showed that one of the children made rapid progress in vocal development, whereas the second developed more slowly. The authors suggested that, despite early implantation, some children may need specialized strategies to stimulate speech development as well as more extensive and specialized management prior to surgery.

Sharma et al. (2002) studied the development of P1 latencies in a group of PDC implanted between 1.3 and 17.5 years. P1 latency is an electrophysiological measure used to infer the maturational status of auditory pathways. The authors found several children in the latter half of the age range who had age-appropriate latencies. In addition, they found that several children who were implanted later in life, but who had benefited significantly from aids before implantation, also had age-appropriate P1 responses. The authors concluded that age at implantation is not the only variable that influences central auditory development: the extent to which variables such as pre-implant unaided and aided thresholds, age at diagnosis and first use of amplification, and amount and nature of rehabilitation can also affect development after the implantation and represent non-negligible sources of influence. With respect to speech production, Tobey et al. (2003) found that age at implantation did not play a significant role in predicting speech performance when considered together with other external variables such as nonverbal intelligence, gender, socioeconomic status, family size and implant characteristics. Finally, in a study conducted with PDC implanted between 1 and 15 years of age, Harrison, Gordon, and Mount (2005) concluded that there is no period of deafness after which a cochlear implant is of little or no value for the development of auditory and auditory-related functions, such as language. The authors used a binary partition analysis to search for one specific break in their data, but were not successful in their attempt. What they found was that the break in their data appeared at different ages of implantation depending on the test or task used, suggesting that each of the behavioural outcomes measured had its own developmental dynamic. The authors concluded that there probably is an age at which the brain is maximally plastic for speech development but there is no specific age after which no progress will be observable.

Conclusion

The influence of auditory restoration on speech development is complex. In children, psychological maturation and the plasticity of the sensory pathways are involved in the natural evolution of communication. Consequently, it becomes difficult to tease out the contribution of the acoustic information versus maturation and rehabilitation effects. Furthermore, these children do not hear normally following the sensory restoration as they still have very limited usable hearing in one ear and their aided thresholds in the implanted ear remain in the mild to moderate range of hearing impairment. As such, they still receive less than optimal access to speech at conversational levels of intensity. Consequently, factors other than sound perception undoubtedly contribute to these children's speech development. Finally, with respect to the variable outcomes often reported in implanted children, age at implantation may not be the only relevant factor. Individual variations in the acquisition of spoken communication by NH children are frequently reported (e.g., Bloom, Lightbown, & Hood, 1975), so it is not surprising that implanted children may fall along a continuum of change with the use of their device. Not only do the factors that influence variation in NH speakers (age, experience, geography, language-related aspects) affect these children, but so do aspects related to hearing loss (Hasenstab & Tobey, 1991). Furthermore, the acquisition and processing of spoken language by the central nervous system are not affected by audiological and socio-demographic features alone, but are also the result of complex interactions between different systems such as perceptual, cognitive and linguistic processes whose developmental trajectory and processing may have been modified by profound deafness (Lachs, Pisoni, & Kirk 2001). Thus, considering variable performance in the light of perceptual, cognitive and linguistic issues, rather than merely age at implantation and the critical period for development, may represent a promising avenue to achieve a finer-grained and more powerful explanation for the diverse performances observed.

References

- Blamey, P. J., Barry, J. G., & Jacq, P. (2001). Phonetic inventory development in young cochlear implant users. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 44, 73–79.
- Bloom, L., Lightbown, P., & Hood, L. (1975). Structure and variation in child language. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, 40, 1–78.
- Borden, G. J., Harris, K. S. and Raphael, L. J. (2003). *Speech science primer: Physiology, acoustics, and perception of speech*, 4th ed. Baltimore: Lippincott Williams & Wilkins.
- Boysson-Bardies, B. de. (1999). *Comment la parole vient aux enfants*. Paris: Éditions Odile Jacob.
- Boysson-Bardies, B. de, Sagart, L., & Bacri, N. (1980). Phonetic analysis of late babbling: A case study of a French child. *Journal of Child Language*, 16, 1–17.
- Brosda, S. (1998). *Du babillage canonique à la naissance du contrôle des degrés de liberté des articulateurs*. Master's thesis, Institut de la Communication Parlée, Université Stendhal, Grenoble III.
- Brosda, S. (1999). *De la variation dans le babillage canonique: l'apprentissage sensorimoteur*. Graduate thesis, Institut de la Communication Parlée, Université Stendhal, Grenoble III.
- Chin, S. B., Tsai, P. L., & Gao, S. (2003). Connected speech intelligibility of children with cochlear implants and children with normal hearing. *American Journal of Speech-Language Pathology*, 12, 440–451.
- Connor, C. M., Hieber, S., Arts, H. A., & Zwolan, T. A. (2000). Speech, vocabulary, and the education of children using cochlear implants: Oral or total communication. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 43, 1185–1204.
- Dale, P. (1991). The validity of a parent report measure of vocabulary and syntax at 24 months. *Journal of Speech and Hearing Research*, 34, 565–571.
- Dale, P. (1996). Parent report assessment of language and communication. In K. Cole, P. Dale, & D. Thal (Eds.), *Assessment of communication and language*, Vol. 6 (pp. 161–182). Baltimore: Paul H. Brookes.
- Davis, B. L., & MacNeilage, P. F. (1990). Acquisition of correct vowel production: A quantitative case study. *Journal of Speech and Hearing Research*, 33, 16–27.

- Dinnsen, D. A., Chin, S. B., & Elbert, M. (1992). On the lawfulness of change in phonetic inventories. *Lingua*, 86, 207–222.
- Dodd, B. (1976). The phonological systems of deaf children. *Journal of Speech and Hearing Disorders*, 41, 185–198.
- Dyson, A. (1988). Phonetic inventories of 2- and 3-year-old children. *Journal of Speech and Hearing Disorders*, 53, 89–93.
- El-Hakim, H., Levasseur, J., Papsin, B. C., Panesar, J., Mount, R. J., Stevens, D., et al. (2001). Assessment of vocabulary development in children after cochlear implantation. *Archives of Otolaryngology – Head and Neck Surgery* 127, 1053–1059.
- Ertmer, D., Kirk, K., Sehgal, S., Riley, A., & Osberger, M. (1997). A comparison of vowel production by children with multi-channels cochlear implants or tactile aids: Perceptual evidence. *Ear and Hearing*, 18, 307–315.
- Ertmer, D. J., & Mellon, J. A. (2001). Beginning to talk at 20 months. Early vocal development in a young cochlear implant recipient. *Journal of Speech and Hearing Research*, 44, 192–206.
- Ertmer, D. J., Young, N., Grohne, K., Mellon, J., Johnson, C., Corbett, K., et al. (2002). Vocal development in young children with cochlear implants: Assessment and implications for intervention. *Language, Speech, and Hearing Services in the Schools*, 33, 185–196.
- Ferguson, C. A. (1978). Learning to pronounce: The earliest stages of phonological development in the child. In F. D. Minifie & L. L. Lloyd (Eds.), *Communicative and cognitive abilities – Early behavioral assessment* (pp. 273–297). Baltimore: University Park Press.
- Fryauf-Bertschy, H., Tyler, R., Kelsay, D., Gantz, B., & Woodworth, G. (1997). Cochlear implant use by prelingually deafened children: The influences of age at implant and length of device use. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 40, 183–199.
- Geers, A. E. (2002). Factors affecting the development of speech, language, and literacy in children with early cochlear implantation. *Language, Speech & Hearing Services in the Schools*, 33, 172–183.
- Geers, A., Brenner, C., Nicholas, J., Uchanski, R., Tye-Murray, N., & Tobey, E. (2002).

- Rehabilitation factors contributing to implant benefit in children. *Annals of Otology, Rhinology and Laryngology*, suppl. 189, 127–130.
- Geffner, D. (1980). Feature characteristics of spontaneous speech production in young deaf children. *Journal of Communication Disorders*, 13, 443–454.
- Goffman, L., Ertmer, D. J., & Erdle, C. (2002). Changes in speech production in a child with a cochlear implant: Acoustic and kinematic evidence. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 45, 891–901.
- Gold, T. (1970) Speech production in hearing-impaired children. *Journal of Communication Disorders*, 13, 397–418.
- Grogan, M. L., Barker, E. J., Dettman, S. J., & Blamey, P. J. (1999). Phonetic and phonologic changes in the connected speech of children using a cochlear implant. *Annals of Otology, Rhinology, & Laryngology*, 104 (suppl. 166), 390–393.
- Hammes, D. M., Novak, M. A., Rotz, L. A., Willis, M., Edmondson, D. M., & Thomas, J. F. (2002). Early identification and cochlear implantation: Critical factors for spoken language development. *Annals of Otology, Rhinology and Laryngology*, 111 (suppl. 189), 74–78.
- Harrison, R. V., Gordon, K. A., & Mount, R. J. (2005). Is there a critical period for cochlear implantation in congenitally deaf children? Analyses of hearing and speech perception performance after implantation. *Developmental Psychobiology*, 146, 252–261.
- Hasenstab, M. S., & Tobey, E. A. (1991). Language development in children receiving Nucleus multichannel cochlear implants. *Ear and Hearing*, 12, 55s–65s.
- Huttenlocher, P. R. (1990). Morphometric study of human cortex development. *Neuropsychologia*, 28, 517–527.
- Ingram, D. (1976). *Phonological disability in children*. New York: Elsevier.
- Ingram, D. (1981). *Procedures for the phonological analysis of children's language*. Baltimore: University Park Press.
- Kent, R. D. (1992). The biology of phonologic development. In C. A. Ferguson, L. Menn, & C. Stoel-Gammon (Eds.), *Phonological development: Models, research, and implications* (pp. 65–90). Timonium, MD: York Press.
- Kent, R. D., & Bauer, H. (1985). Vocalizations of 1-year-olds. *Journal of Child Language*,

- 12, 491–526.
- Kent, R. D. & Murray, A. D. (1982). Acoustic features of infant vocalic utterances at 3, 6 and 9 months. *Journal of the Acoustical Society of America*, 72, 353–365.
- Kent, R. D., Osberger, M. J., Netsell, R., & Goldschmidt Hustedde, C. (1987). Phonetic development in identical twins differing in auditory function. *Journal of Speech and Hearing Research*, 52, 64–75.
- Kuhl, P. K., & Meltzoff, A. N. (1984). The intermodal representation of speech in infants. *Infant Behavioral Development*, 7, 361–381.
- Lách, R., Ling, D., Ling, L., & Ship, N. (1970). Early speech development in deaf infants. *American Annals of the Deaf*, 115, 522–526.
- Lachs, L., Pisoni, D. B., & Kirk K. I. (2001). Use of audiovisual information in speech perception by prelingually deaf children with cochlear implants: A first report. *Ear and Hearing*, 22, 236–251.
- Lalevée, C. (2003). *Développement du contrôle de la production de parole, du cadre syllabique vers la syllabe: suivi audio-visuel de 2 enfants de 6 à 12 mois*. Graduate thesis, Institut de la Communication Parlée, Université Stendhal, Grenoble III.
- Lynch, M. P., Oller, K. D., & Steffens, M. (1989). Development of speech-like vocalizations in a child with congenital absence of cochleas: The case of total deafness. *Applied Psycholinguistics*, 10, 315–333.
- MacWhinney, B. (2000). *The CHILDES project: Tools for analyzing talk*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Markides, A. (1970). The speech of deaf and partially hearing children with special reference to factors affecting intelligibility. *British Journal of Disorders of Communication*, 5, 126–140.
- Maskarinec, A. S., Cairns, G. F., Jr., Butterfield, E. C., & Weamer, D. K. (1981). Longitudinal observations of individual infant's vocalizations. *Journal of Speech and Hearing Disorders*, 46, 267–273.
- Mavilya, M. P. (1972). Spontaneous vocalization and babbling in hearing impaired infants. In G. Fant (Ed.), *International symposium on speech communication ability and profound deafness* (pp. 163–171). Washington, DC: Alexander Graham Bell Association for the Deaf.

- McGarr, N. S. (1987). Communication skills of hearing-impaired children in schools for the deaf. *ASHA Monographs*, 26, 91–107.
- Morrison, J. A., & Shriberg, L. D. (1992). Articulation testing versus conversational speech sampling. *Journal of Speech and Hearing Research*, 35, 259–273.
- Nober, E. H. (1967). Articulation of the deaf. *Exceptional Children*, 33, 611–621.
- O'Donoghue, G. M., Nikolopoulos, T. P., Archbold, S. M., & Tait, M. (1999). Cochlear implants in young children: The relationship between speech perception and speech intelligibility. *Ear and Hearing*, 20, 419–425.
- Oller, D. K. (1986). Metaphonology and infant vocalizations. In B. Lindblom & R. Zetterstrom (Eds.), *Precursors of early speech* (pp. 21–35). New York: Stockton Press.
- Oller, D., & Eilers, R. (1975). Phonetic expectation and transcription validity. *Phonetics*, 31, 288–304.
- Oller, D. K., Eilers, R. E., Bull, D. H., & Carney, A. E. (1985). Prespeech vocalizations of a deaf infant: A comparison with normal metaphonological development. *Journal of Speech and Hearing Research*, 28, 47–63.
- Osberger, M. J., Maso, M., & Sam, L. S. (1993). Speech intelligibility of children with cochlear implants, tactile aids, or hearing aids. *Journal of Speech and Hearing Research*, 36, 186–203.
- Osberger, M. J., & McGarr, N. S. (1982). Speech production characteristics of the hearing-impaired. *Speech and Language: Advances in Basic Research and Practice*, 8, 221–283.
- Paschall, L. (1983). Development at 18 months. In J. Irwin & S. Wong (Eds.), *Phonological development in children: 18–72 months*. Carbondale, IL: Southern Illinois University Press.
- Pendergast, K., Soder, A., Barker, J., Dickey, S., Gow, J., & Selmar, J. (1966). An articulation study of 15255 Seattle first grade children with and without kindergarten. *Exceptional Children*, 32, 541–547.
- Robb, M. P., & Bleile, K. M. (1994). Consonant inventories of young children from 8 to 25 months. *Clinical Linguistics and Phonetics*, 8, 295–320.
- Robinshaw, H. M. (1996). Acquisition of speech, pre- and post-cochlear implantation: Longitudinal studies of a congenitally deaf infant. *European Journal of Disorders of*

- Communication*, 31, 121–139.
- Samar, V. J., & Metz, D. E. (1991). Scaling and transcription measures of intelligibility for populations with disordered speech: Where's the beef? *Journal of Speech and Hearing Research*, 34, 699–702.
- Sander, E. K. (1972). When are speech sounds learned? *Journal of Speech and Hearing Disorders*, 37, 55–63.
- Schorr, E. A., Fox, N. A., van Wassenhove, V., & Knudsen, E. I. (2005). Auditory-verbal fusion in speech perception in children with cochlear implants. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102, 18748–18750.
- Sehgal, S. T., Kirk, K. I., Svirsky, M., Ertmer, D. J., & Osberger, M. J. (1998). Imitative consonant feature production by children with multichannel sensory aids. *Ear and Hearing* 19, 72–83.
- Selby, J. C., Robb, M. P., & Gilbert, H. R. (2000). Normal vowel articulations between 15 and 36 months of age. *Clinical Linguistics & Phonetics*, 14, 255–265.
- Serry, T. A., & Blamey, P. J. (1999). A 4-year investigation into phonetic inventory development in young cochlear implant users. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 42, 141–154.
- Sharma, A., Spahr, A., Dorman, M., & Todd, N. W. (2002). Early cochlear implantation in children allows development of central auditory pathways. *Annals of Otolaryngology, Rhinology, and Laryngology*, 111, 38–41.
- Shriberg, L. D., & Lof, G. L. (1991). Reliability studies in broad and narrow phonetic transcription. *Clinical Linguistics & Phonetics*, 5, 225–279.
- Smith, C. R. (1975). Residual hearing and speech production in deaf children. *Journal of Speech and Hearing Research*, 18, 795–811.
- Stoel-Gammon, C. (1985). Phonetic inventories, 15–24 months: A longitudinal study. *Journal of Speech and Hearing Research*, 28, 505–512.
- Stoel-Gammon, C. (1987). The phonological skills of two-year-olds. *Language, Speech, and Hearing Services in Schools*, 18, 323–329.
- Stoel-Gammon, C. (1988). Prelinguistic vocalizations of hearing-impaired and normally hearing subjects: A comparison of consonantal inventories. *Journal of Speech and Hearing Research*, 53, 302–315.

- Stoel-Gammon, C., & Cooper, J. A. (1984). Patterns of early lexical and phonological development. *Journal of Child Language*, 11, 247–271.
- Stoel-Gammon, C., & Herrington, P. B. (1990). Vowel systems of normally developing and phonologically disordered children. *Clinical Linguistics & Phonetics*, 4, 145–160.
- Stoel-Gammon, C., & Otomo, K. (1986). Babbling development of hearing-impaired and normally hearing subjects. *Journal of Speech and Hearing Research*, 51, 33–41.
- Svirsky, M., Robbins, A., Kirk, K., Pisoni, D., & Miyamoto, R. (2000). Language development in profoundly deaf children with cochlear implants. *Psychological Science*, 11, 153–158.
- Tobey, E. A., Geers, A. E., & Brenner, C. (1994). Speech production results: Speech feature acquisition. *The Volta Review*, 96, 109–129.
- Tobey, E. A., Geers, A. E., Brenner, C., Altuna, D., & Gabbert, G. (2003). Factors associated with development of speech production skills in children implanted by age five. *Ear and Hearing*, 24, S36–S45.
- Tobey, E. A., Pancamo, S., Staller, S. J., Brimacombe, J. A., & Beiter, A. L. (1991). Consonant production in children receiving a multi-channel cochlear implant. *Ear and Hearing*, 12, 23–31.
- Tye-Murray, N., & Kirk, K. I. (1993). Vowel and diphthong production by young users of cochlear implants and the relationship between the Phonetic Level Evaluation and spontaneous speech. *Journal of Speech and Hearing Research*, 36, 488–502.
- Tye-Murray, N., Spencer, L., & Woodworth, G. G. (1995). Acquisition of speech by children who have prolonged cochlear implant experience. *Journal of Speech and Hearing Research*, 38, 327–337.

Table 1.

Clinical and demographic characteristics of implanted participants

Subject	Aetiology	Age at diagnosis (months)	PTA DHL (dB)	P-I hearing aid use (months)	Language (P-I)†	Speech (P-I)†	Age at surgery (months)
1	Meningitis	25	107	11	3	5	35
2	Unknown	6	100	47	3	5	59
3	Unknown	28	115	42	3	3	73
4	Unknown	12	102	48	2	3	49
5	Connexin 26	21	108	12	0	5	48
6	Hereditary	4	117	12	2	2	28
7	Cytomegal o-virus	8	112	36	0	1	58
8	Neonatal meningitis	4	105	18	1	1	28
9	Unknown	16	98	18	0	2	48
10	Unknown	11	115	12	2	3	25
11	Unknown	24	108	21	0	1	48
12	Unknown	3	105	19	0	2	30
13	Unknown	20	105	36	0	5	78
14	Hereditary	12	98	30	0	2	45
15	Unknown	6	110	30	0	3	39

16	Hereditary	0	108	36	2	5	45
17	Unknown	14	117	18	0	1	48
18	Unknown	15	105	12	1	1	38
19	Unknown	15	115	14	0	2	28
20	Unknown	4	105	27	1	3	31
22	Unknown	11	105	39	0	1	50

Participants 1–10 are girls.

† Based on questionnaires

PTA: Pure-tone average; DHL: Degree of hearing loss; P-I: Pre-implantation

Table 2

Number of utterances used in analyses

Subject	Assessment at 6 months	Assessment at 12 months	Assessment at 18 months
1	100	100	100
2	100	100	100
3	97	100	100
4	33	45	50
5	89	100	100
6	1	51	100
7	87	100	100
8	15	36	100
9	4	100	35
10	100	100	100
11	26	23	18
12	16	100	100
13	86	74	93
14	100	100	100
15	1	19	35
16	93	100	100
17	32	72	100
18	0	1	59
19	23	52	95
20	59	4	36
21	31	85	100

Table 3

Percentages of unrounded front, rounded front, central, rounded back and nasal vowels produced for each target vowel category, at 6, 12, and 18 months post-implantation

PRODUCTION

**T
A
R
G
E
T**

	Months	Unrounded Front	Rounded Front	Central	Rounded Back	Nasals
Unrounded Front	6	85.0	1.7	10.7	2.6	0
	12	87.9	0.7	9.9	1.3	0.2
	18	91.5	1.5	6.3	0.6	0.2
Rounded Front	6	3.2	61.3	19.4	16.1	0
	12	0	68.6	11.8	19.6	0
	18	0	92.3	3.8	3.8	0
Central	6	3.3	1.0	92.5	2.4	0.8
	12	5.5	1.6	90.3	2.5	0.5
	18	5.3	2.6	90.1	1.8	0.2
Rounded Back	6	2.3	7.9	12.1	77.6	0
	12	1.6	2.7	7.6	88.1	0
	18	2.0	2.0	18.4	76.2	1.5
Nasal	6	5.3	1.0	40.9	14.4	38.5
	12	4.5	1.5	39.5	16.5	38
	18	3.2	0.3	18.3	11.9	66.2

Table 4.

Percentages of stops, fricatives, liquids and glides produced for each target consonant category, at 6, 12, and 18 months post-implantation

P R O D U C T I O N					
	Months	Stop	Fricative	Liquids	Glide
T A R G E T	6	95.4%	0.4%	3.8%	0.4%
	12	98.1%	0.6%	1.3%	0%
	18	98.2%	0.9%	0.7%	0.2%
F r i c a t i v e	6	21.4%	64.3%	6.5%	7.7%
	12	21.8%	75.8%	1.1%	1.4%
	18	9%	88.5%	0.5%	2%
L i q u i d s	6	11.6%	0.7%	85%	2.3%
	12	11.5%	1.9%	85.2%	1.4%
	18	6.2%	0.5%	91.2%	2.1%
G l i d e	6	9.3%	0%	0%	90.7%
	12	2.0%	1.3%	0.7%	96%
	18	2.0%	0.5%	0%	97.5%

Table 5.

ANOVA results for the different speech production categories

Linguistic category	Assessment period (in months post-implantation)	Group (based on age at implantation)	Mean (Standard deviation)	F value (p < .05)
Vowels – Total number of spoken sounds	6	Early	36 (50.64)	(2,12) = 11.68
		Late	107.25 (29.95)	
	12	Early	61.75 (42.88)	
		Late	121 (22,33)	
	18	Early	115.5 (4.93)	
		Late	132.25 (9.54)	
Consonants –	6	Early	35.25 (53.54)	(2,12) = 11.32
		Late	95 (19.49)	

Total number of spoken sounds	12	Early	50.75 (35.85)	
		Late	114.25 (33.82)	
	18	Early	115.5 (4.2)	
		Late	124.25 (4.42)	
Vowels – Correct production	6	Early	28 (45.56)	(2,12) = 17.30
		Late	70.25 (19.6)	
	12	Early	52.25 (43.36)	
		Late	81.25 (20.30)	
	18	Early	98 (15.98)	
		Late	102.25 (13)	
Consonants –	6	Early	26.25 (42.66)	(2,12) = 23.79
		Late	72.25	

Correct production			(21.91)	
	12	Early	41.5 (33.09)	
		Late	78.75 (22.69)	
	18	Early	100.25 (15.76)	
		Late	107.25 (11.76)	
Vowels – Total production	6	Early	36 (50.64)	(2,12) = 11.32
		Late	107.25 (29.95)	
	12	Early	61.75 (42.88)	
		Late	121 (22.33)	
	18	Early	115.5 (4.93)	
		Late	132.25 (9.54)	
	6	Early	52 (69.71)	(2,12) = 4.52

Consonants – Total production		Late	144 (21.93)	
	12	Early	85.75 (28.86)	
		Late	163 (52.22)	
	18	Early	143.25 (11.84)	
		Late	143.75 (19)	

2.3 ARTICLE 3

Speech intelligibility following cochlear implantation in prelingually deaf children

Marie-Eve Gaul Bouchard, Lucie Ménard and Henri Cohen^o

Soumis à *Journal of Speech, Language and Hearing Research*

SPEECH INTELLIGIBILITY FOLLOWING COCHLEAR IMPLANTATION
IN PRELINGUALLY DEAF CHILDREN

Marie-Eve Gaul Bouchard^{1,2}, Lucie Ménard^{1,2}, Henri Cohen^{1,3}

¹Cognitive Science Institute, Université du Québec at Montreal

²Phonetics Laboratory, Université du Québec at Montreal

³Laboratoire de Psychologie et Neurosciences Cognitives, Université Paris Descartes
– CNRS (UMR 8189)

Address for correspondence:

Henri Cohen, Ph.D.
LPNCog, Université Paris Descartes – CNRS
Henri.cohen@univ-paris5.fr

Marie-Eve Gaul Bouchard
ISC, UQAM
me.gaulbouchard@gmail.com

Acknowledgments: We thank Dr. Marie-Thérèse Le Normand for giving us access to the children who participated in this study. This research was aided by grants from SSHRC (Ottawa) and FQRSC (Quebec).

Intelligibilité de la parole suite à l'implantation cochléaire d'enfants sourds pré-linguaux

Résumé

40 auditeurs naïfs et 2 transpositeurs expérimentés ont dû identifier des syllabes produites par un groupe de 12 enfants sourds pré-linguistiques qui ont reçu un implant cochléaire. Il était prédit qu'une augmentation du taux d'accord inter-juges entre les auditeurs naïfs et expérimentés reflétait une amélioration dans la prononciation des enfants. L'influence de l'âge à l'implantation sur la qualité de parole a également été examinée. Les productions de paroles ont été enregistrées et filmées durant une session de jeu libre standardisée, 6, 18 et 36 mois post-implantation. Elles ont ensuite été segmentées en syllabes de type CV. Les espaces vocaliques ont été utilisées pour classer les stimuli perçus et les consonnes ont été ordonnées selon les traits de voisement, de lieu et de mode articulaire. Les analyses ont révélé 2 résultats majeurs. Premièrement, que les accords entre les juges naïfs et expérimentés différaient selon le type de phonème (voyelles vs. consonnes). Deuxièmement, que l'âge à l'implantation ne pouvait différencier le niveau de capacité expressive des enfants implantés. De tels résultats soulignent (accentuent) l'importance de se pencher sur des variables extra-cliniques afin de mieux comprendre la variabilité à la suite de cette restauration sensorielle.

Speech intelligibility following cochlear implantation in prelingually deaf children

Abstract

40 naïve listeners and 2 experienced raters were asked to identify syllables produced by a group of 12 prelinguistically deaf children who received a cochlear implant. Increase between the experienced and more naïve judges' agreements in the identification of syllables was predicted to reflect improvement in the children's pronunciation. Influence of age at implantation on the speech clarity was also investigated. Speech production was recorded and filmed during a standardized free play session at 6, 18 and 36 months following surgery and was then segmented into CV-syllables. Vowel spaces were derived from perceived stimuli and consonants were classified according to voicing, manner and place of articulation. The analyses revealed two key findings. First, the naïve and experienced raters' agreements differed depending on the speech class (vowel vs. consonant). Second, age at implantation did not help differentiate the various levels of expressive capacities of these implanted children. These results thus emphasize the need to focus on extraclinical variables to better understand performance variability following this auditory restoration.

Introduction

Studies of speech development have shown that three mechanisms are critical to the changes observed in the vocalizations produced by infants: the natural maturation of the vocal apparatus, the development of motor control over the speech organs and the evolution of perceptual capacities. Altogether, these processes induce a series of modifications and impart their adult-like form to the speech structures. They also permit the occurrence of vocal learning, the process by which the young child acquires the sound repertoire of her native tongue. A number of studies have shown the infants' natural tendency to imitate vocal production. For example, Kuhl and Meltzoff (1996; 1982) showed that infants between 12 and 20 months of age who were listening to a particular vowel, produced vocalizations resembling that vowel. They also showed that the vowel categories produced occupied separate spaces in the vocalic trapeze.

The mechanisms by which vocal learning supports speech acquisition are not perfectly understood. According to Kuhl and Meltzoff (1996), infants selectively attend to vocal sounds in the speech stream and remember them, resulting in gradual perceptual tuning to major phonological categories of the language they hear. Infants next begin producing differentiated sounds, shaping their vocal output to reach target sounds. This is a process likely based on a comparison between auditory feedback from self-vocalizations and the acquired perceptual tuning.

Children, who are born deaf or have become deaf before age 3, do not have full access to this acoustic feedback and their vocal imitation capacity may thus be significantly reduced. As a result, deaf children present with major language delays, a broad range of abnormal speech behaviors and, most importantly, with major difficulty in being understood by others (O'Donoghue, Nikolopoulos, Archbold, & Tait, 1999; Smith, 1982; Monsen, 1983; Gold, 1981; Markides, 1970; McGarr, 1983).

These past decades, the development of cochlear implants has helped some prelingually deaf children with severe-to-profound hearing impairment (over 90 dB hl) to gain access to environmental sounds and information about spoken language. Cochlear implants provide

acoustic information to the auditory system by means of direct electrical stimulation of the surviving auditory nerve fibers. Most of the studies assessing these devices as aids to speech perception, have concluded that children using multichannel cochlear implants receive adequate auditory information to understand words and sentences (Osberger, Barker, Zimmerman-Phillips, Geier, 1999; Illg., Von Der Haar-Heise, Goldring, Lesinski-Schiedat., Battmer & Lenarz, 1999; Uziel, Reuillard-Artieres, Sillon, Vieu, Mondain, Piron, Tobey, 1996; Osberger, Miyamoto, Zimmerman-Phillips, Kemink, Stroer, Firszt, Novak, 1991). However, less attention has been paid to cochlear implants as a support for speech production. Given the relationship between speech perception and production, it is important to assess the speech production abilities of implanted children.

Most studies on post-implantation speech development have relied on the perceptual judgment of either experienced judges or inexperienced listeners. Experienced listeners are mainly involved in phonetic or phonologic inventory studies, often relying on phonetic transcription, whereas inexperienced listeners have participated in intelligibility studies. Overall, results following the auditory restoration have shown that acquisition patterns of speech sounds tended to approximate those observed in normal hearing (NH) children (Blamey, Barry & Jacq, 2001; Geers & Tobey, 1995; Serry & Blamey, 1999; Serry, Blamey & Grogan, 1997; Spencer, Tye-Murray & Tomblin 1998; Tobey, Geers, Brenner, Altuna, & Gabbert, 2003) and that speech intelligibility improved as experience with the implanted device increased (Dawson, Blamey, Dettman, Rowland, Barker, Tobey, Busby, Cowan, & Clark, 1995; Mondain, Sillon, Vieu, Lanvin, Reuillard-Artieres, Tobey, & Uziel, 1997; Tobey, Angelette, Murchison, Nicosia, Sprague, Staller, Brimacombe, & Beiter, 1991; Tobey & Hasenstab, 1991).

Though highly instructive about speech development in general, these studies do not clarify how these children use acoustic feedback to construct or refine their articulatory maps — and how this, in turn, impacts on the intelligibility of speech produced. In both inventory and intelligibility studies, judges are presented with speech material that is generally integrated into context and are likely to be biased by perceptual restoration effects, i.e., assigning correct meaning and linguistic value to speech sequences in spite of missing or

erroneous information in the acoustic signal (Warren & Obusek, 1971). The impact of contextual information on the perception scores of hearing listeners judging speech of hearing-impaired children has been reported (Sittler, Schiavetti, Metz, 1983; McGarr, 1983).

Influence of age at implantation

Speech development in prelingually deaf children with cochlear implants is generally characterized by progress in production abilities following the sensory restoration. However, individual variability in performance is a frequently reported phenomenon (e.g., Nikolopoulos, O'Donoghue, & Archbold, 1999) with age at implantation being one the most frequently reported effect (Fryauf-Bertschy, Tyler, Kelsay, Gantz & Woodworth, 1997; Nikolopoulos, et al., 1999; Osberger et al., 1994). The results of several studies clearly point to the risk of missing or delaying crucial milestones in speech and language development when deafness occurs (Yoshinaga-Itano, 2002) and it is believed that implantation at an early age may help with speech perception. This would translate into an augmented capacity for speech acquisition. There is evidence that prelingually deaf children implanted before age 5 show better linguistic outcomes (Tye-Murray, Spencer and Woodworth, 1995; Osberger, Maso and Sam, 1995), with a definite advantage for those implanted at 18 months of age (Nicholas & Geer, 2004).

Svirsky, Robbins, Kirk, Pisoni and Miyamoto (2000) have developed a predictive growth model to account for the expressive and receptive language growth of pediatric cochlear implant (CI) recipients, before and after implantation. Their model fits with both observed and predictive scores — i.e. the expected language score that the child would have obtained if she had never received a cochlear implant — and predicts that children implanted at or before 54 months of age will show a language growth comparable to that of NH children. The conclusion of these studies and models is that early implantation permits deaf children to capitalize upon enhanced brain sensitivity for speech and language development.

Other reports were not able to find this clear advantage of early implantation after implantation. Wang, Huang, Wu and Kirk (2007) examined the communication outcomes of 29 Mandarin-speaking children on various language-related variables and compared the

performances between children implanted before and after 3 years old. Children in the younger group obtained better performances for speech perception and production but no significant difference were noted on speech intelligibility and self perception of ability to communicate in daily situations. Gaul Bouchard and Cohen (submitted) reported that age at implantation influenced neither the rate of acquisition nor the amount of speech produced, suggesting that this factor does not play a crucial role in speech development following implantation. Finally, evidences of brain plasticity for language that extended beyond the first few years of life until adolescence were also reported (Hutenlocher, 1990). Therefore it is still not clear exactly how much of an advantage it might be to receive an implant early.

Objectives of the study

This study was guided by three objectives: comparing the perceptual judgments made by experienced and inexperienced listeners on syllables produced by prelingually deaf children who received a cochlear implant; assessing the naïve and experienced raters in the perception of vowels and consonants; and clarifying the influence of age at implantation on the observed outcomes. In this perspective, the aim of the present study was to assess the extent to which the articulatory abilities of these children improved following the cochlear implantation surgery.

Judges familiar or unfamiliar with the speech of deaf children were asked to identify syllables taken from the spontaneous conversations of implanted children. Syllable identification was preferred to sentence, word or phoneme identification. They are less sensitive to auditory illusion as they provide neither semantic nor contextual information likely to influence perceptual decisions. Syllables are the unit of choice in the analysis of young children vocalizations (Kent & Miolo, 1995) and correspond to the basic learning unit in the phonological structure of a language (Kent, 1992). Finally, syllables constitute the first domain of articulatory organization from which consonants and vowels will eventually emerge as independently controllable units (Menn, 1983; Davis & Mac Neilage, 1990; Ferguson, 1978; Lindblom, Mac Neilage, & Studdert-Kennedy, 1983).

Speech intelligibility is usually defined as a percentage of correspondence between intended and produced targets. In the present study, improvement in intelligibility was considered in terms of common agreement between experienced and naïve listeners because speech targets were not always

identifiable given that they were extracted from spontaneous conversation. It was then predicted that improvement in the children's pronunciation should be reflected by an increase between the experienced and more naive judges' agreements in the identification of syllables.

Methods

Participants:

Following McGarr (1983), an individual with one year or more experience in listening to and transcribing the speech of the deaf is an experienced listener. Two experienced listeners, both with normal hearing and native speakers of French, were recruited and conducted the transcriptions of speech from the audiovisual recordings. Forty naive adult listeners (seven men and 33 women) with no previous experience with the speech of deaf people were also recruited on campus to participate in the study. All were native speakers of French and had normal hearing. They all signed consent forms approved by the University Review Board and were paid for their participation.

Clinical subjects: The subjects were 12 prelingually deaf French children, eight girls and four boys who were surgically implanted with a multichannel cochlear implant. Their mean age at implantation was 50.33 mos of age (SD=19 mos), with a range from 25 to 76 mos. The participants were selected from a larger sample of 50 children who were followed at one of four French hospitals in Montpellier, Lyon, Toulouse and Paris. No conscious bias was exercised in the selection of these children. The only criterion of exclusion was the presence of a handicap other than deafness. All children had complete audiological, neurological and linguistic evaluations prior to receiving the cochlear implant. Once fitted with the device, all children received fine-tuning of their implant to ensure optimal access to acoustic information. All children except two were implanted with the Nucleus CI24M (Cochlear Corporation) and used the spectral-peak (SPEAK) coding strategy. Subject 4 was implanted with the Clarion multichannel cochlear implant (Advanced Bionics Corporation) and used the Continuous Interleaved Sampling (CIS) strategy. Subject 6 was implanted with a Digisonic cochlear implant (MXM Medical Technologies). All participants were total communication users — i.e., they lived in a home environment that principally used oral language with

communicative support such as cued speech, Signed French (SF) and French Sign Language (FSL) made available to them when necessary. Preoperative hearing loss in the better ear was expressed as pure-tone average threshold (PTA) at frequencies of 500, 1000 and 2000 Hz in dB HL. The socio-demographic and clinical characteristics of the subjects are summarized in Table 1.

Insert Table 1 about here

Speech stimuli :

The speech stimuli were taken from videotaped spontaneous utterances, as part of the children's ongoing supervision. Assessments were conducted at 6, 18 and 36 months post-implantation. The 20 min samples were obtained by involving the child in a standardized free-play session with a familiar speech therapist or parent in a quiet room. The set up included Fisher-Price replicas of household items for the younger children, and illustrated story-books for the older children. During the narrative procedure, children were asked to verbalize as many manipulations and actions as possible in and around the house or to invent a story inspired from the pictures in the book.

All speech materials were extracted from videotapes and digitally edited at a sampling rate of 22050 Hz. Using GoldWave software, the samples were stored as wave (.wav) files, in 16-bit format. Given the children's limited linguistic abilities at six months after implantation, all utterances except crying, laughter and vegetative sounds were considered at that assessment period. An utterance was defined as a vocalization or a group of vocalizations separated from all others by either audible ingressive breaths or a judge's intuition about utterance boundaries —sometimes indicated by a silence of 1s. or longer in duration (e.g. Lynch, Oller, & Steffens, 1989). For the assessments at 12 and 18 months, only utterances for which the target could be identified were extracted from the digitized speech sample and considered for acoustic analysis. All speech productions were normalized to maintain a relatively constant sound level across the recordings.

Transcription

Broad transcription of extracted syllables was adopted following Shriberg and Lof (1991), using the symbols of the International Phonetic Association (IPA) notation system. Point-by-point comparisons of the transcriptions were conducted. When disagreement occurred between the two transcribers, that segment was rejected.

Acoustic criteria

Only syllables that had been labeled by the experienced transcribers as stopped syllables were included in the tests. To ensure the acoustic quality of the stop syllables, segments were analyzed with a broadband spectrogram using PRAAT software (<http://www.fon.hum.uva.nl/praat/>). Segments that did not include a clear nucleus, margins and formant transitions were rejected. Following Johnson (1997) a marked sign of closure for consonant and glottal pulse for vowels were the necessary criteria for retaining the speech segments.

Classification

As the intended phonological target was not always reliably identifiable, especially at the 6-month assessment period, consonants were divided into three areas according to their perceived place of articulation: (1) labials (*b, p*); (2) alveolars (*d, t*), and (3) velars (*g, k*). Three areas were also created for vowels: (1) central open (*a*), (2) front closed (*i, e, y*) and (3) back closed (*u, o*). As children are not equally talkative and to ensure a balanced presentation of stimuli, a maximum of 30 syllables per children per area at each assessment was fixed. A total of 891 syllables were thus included in the test.

Identification test

Using PRAAT, two tests of perception were made up, one for the identification of vowels and one for consonants. Each test consisted of a blocked and mixed condition. In the blocked condition, all the syllables produced by children were presented randomly, each child separately. In the mixed design, all the syllables produced by all children were randomly presented to listeners. In both tests 5 control stimuli (/run/ for consonants and /sun/ for vowels) were included in order to control for the listeners' attention. These two stimuli were

uttered by a woman and were recorded using a high quality microphone (Sure SM86). All stimuli were randomized.

Listening procedure

20 naive listeners completed the vowel identification test, and 20 other subjects listened to the consonants. Each of the 40 listeners completed the task in a quiet room via high-quality headphones. Judges listened to each syllable once and selected the appropriate answer on the screen corresponding to what she thought she had heard. For the consonants, there were eight choices: /p/, /t/, /k/, /b/, /d/, /g/, /r/, or *other*; for vowels, they were: /i/, /é/, /o/, /un/, /u/, /a/, /ou/ or *other*. Listeners could not alter their response once the selection was made. Each testing session lasted approximately 90 minutes. Eight practice trials were provided before the formal listening task. Syllables were presented binaurally through Optimus (Nova 403) headphones at a comfortable listening level.

Results

Both qualitative and quantitative analyses were performed. Fine-grained description of raters perceptual agreements and divergences for both vowels and consonants was presented using matrices. Statistical analyses were also conducted to examine the effect of the phoneme's articulatory feature (speech area) and time post-implantation.

Matrices

The matrices represent the percentage of agreement between the judgments made by naive and experienced listeners. For example, in area 1-central open vowel, 80% of inexperienced judges agreed with the perceptual decision of the experienced listeners at 6 months post-implantation. For vowels, correspondence between experienced and inexperienced judges was the greatest in area 3-back closed vowels. Perceptual agreements for area 2 remained low and steady decrease was observed, suggesting that targets located in the high front region were the most difficult to produce by the implanted children. Results also showed that when a non-correspondence occurred, vowels were likely to be perceived as target in the same area or in an area of the same height.

For consonants, agreement scores were much lower but the patterns were the same as those observed for vowels. For example, area 3 obtained the highest score of agreement as opposed to area 2 who presented the lowest rate. Finally, errors were made when judging unvoiced phonemes more frequently than when judging voiced ones. This pattern of errors suggests that the voicing feature is not yet mastered by these children.

Insert tables 2 and 3 about here

ANOVA:

A series of ANOVA was performed on the within subject variables in order to answer questions related to the impact of listening condition (block vs. mixed), sound class (vowels vs. consonants), speech area and finally time on the level of agreement between the experienced and naïve listeners.

One-way repeated ANOVA performed to analyze the effect of the listening condition yielded a significant main effect ($F(1, 11) = 8.9, p = 0.012$). Inter-rater agreement of the blocked condition was smaller than the one of the unblocked condition (0.729 vs. 0.744). Given this result, a first series of analysis were performed that considered the effect of the listening condition as a potential factor of interaction. None of the analysis turned out to be significant. Thus, in order to increase overall power level of subsequent analyses, listening condition was omitted and alpha level adjusted to 0.01.

The effect of sound class (vowels vs. consonants) was subjected to an univariate repeated ANOVA, which resulted in a significant difference ($F(1, 11) = 227.40, p < 0.01$) favoring vowels over consonants. The one-way repeated ANOVA, which was performed to analyze the effect of speech area (vowels and consonants confounded) yielded a non significant F-ratio ($F(2, 22) = 4.28, p = 0.027$). This result was nevertheless considered as showing a significant tendency. Helmert contrast analysis showed that the main effect of speech area was only related to the significant difference between the mean of the speech area 2 and 3 ($F(1, 11) = 14.28, p = 0.003$.) The mean level of rater agreement for area 1, 2, and 3 was

respectively 0.74, 0.69, and 0.78, suggesting that for both vowels and consonants, area 2 was the one with the lowest inter-rater agreement.

Finally, the effect of time was observed with a one-way repeated ANOVA, which resulted with a non significant effect of time. The interaction of time with both the speech area and the class of phonemes (vowels vs. consonants) was also analyzed with two-ways repeated ANOVA, which yielded non-significant interaction for the two variables.

Influence of age at implantation

Age at implantation, which corresponded to a between subject variable was also tested using an univariate ANOVA. Two series of analysis were performed. A first one with all the 12 implanted participants. In order to contrast more effectively the impact of age at implantation, a second series of analysis only included the participants implanted early (i.e. between 25 and 33 months) and the later-implanted children (i.e. between 72 and 78 months). This division permitted to clearly differentiate between the two groups, for an approximatively 36 months difference in children development represents a huge amount of time. Altogether the univariate ANOVAs and the t-tests performed yielded no significant F- and t-ratio, suggesting that there was no significant difference in the level of rater-agreement between children implanted and different ages. Obtained means for each of the age groups showed that inter-rater agreements tended to increase with age at implantation, in other words children implanted later produced speech that tended to be more intelligible to both EXP and INEXP listeners

Discussion

The current study investigated the evolution of speech intelligibility in a group of prelingually deaf children who received a cochlear implant. Perceptual judgments of a group of naive listeners were compared to those of experienced raters in order to infer about improvement in the implanted children's pronunciation. Influence of age at implantation on the observed performance was also investigated.

Obtained results revealed two key findings. First, that listeners' agreements significantly differ depending on the speech class (vowel vs. consonant). Second, that age at implantation did not differentiate the expressive capacities of the implanted children.

The data revealed that levels of agreement greatly depended on the type of speech sounds produced. Throughout the study, perceptual scores remained significantly higher for vowels than for consonants. More specifically the area 3 (/u/ and /o/) obtained the highest scores of agreement. Such result was unexpected since tongue backing represents a complex articulatory gesture, which is usually one of the last to be mastered by normally hearing children (Kent and Bauer, 1985; Brosda, 1998). This result might be related to the arrangement of electrodes that convey information about F1 and F2 (Tye-Murray & Kirk, 1993). Formant values of these vowels, both located in the low frequency regions may have permitted these children to produce them on a fairly regular basis, even before sensory restoration, because it was among the most salient vowels that they perceived. Heightened visibility of these rounded vowels may represent an alternative explanation, for lips rounding and protrusion are among the most robust feature in presence of acoustic deprivation (Robert Ribes et al., 1996).

Perceptual agreement for consonants was much lower but once again favored the area 3, which corresponded to the velar consonants /k/ and /g/. This result was unexpected given that implanted children usually favor more visible consonants such as labials as opposed to consonants produced in more posterior region such as velars (Ertmer & Mellon, 2001; Serry & Blamey, 1999; Blamey, Barry & Jacq, 2001). In addition, velar phonemes that are more influenced by coarticulation, produced a continuously varying signal that hinders (restrains) their perception (Nober, 1967) and consequently affect their later production

Results of this investigation may also be explained with reference to the DIVA model of speech motor planning (Guenther, 2006), which hypothesizes that the primary production target for a speech sound is a region in the auditory perceptual space. In this sense, this model helps to characterize the impact of auditory information for appropriate motor control as well

as the role of feedback and feedbacks alterations in speech production. The increase in inter-rater agreement obtained for vowels suggest that partial sensory restoration provided by the CI allowed prelingually deaf children to initiate the tuning of their auditory feedback system and to gradually use this information to monitor the production of these speech sounds that do not require highly complex articulation strategies. This feedback control is then involved in the elaboration of a mapping between auditory errors in the new acoustic space and corrective motor action. On the other hand, the limited intelligibility improvement observed for consonants may be explained by the fact that the auditory feedback provided by the cochlear implant may not be sufficient to permit the development of clear acoustico-perceptual targets in the auditory space. In the absence of reliable auditory retroaction, alternative cues such as orosensory feedback and vision controlled speech production, but these less than optimal cues may not be rich enough to guide the production of consonants, whose articulation implies more refined and complex motor patterns. Consequently, maladaptive production strategies that may be difficult to overcome arise and speech is less intelligible. The impacts of poorly tuned articulatory movements may be amplified when the absence of context prevents perceptual restoration effects.

Influence of age at implantation

Our results showed that age at implantation did not contribute to the derived intelligibility scores. These results are in line with those reported by others. For example, Ertmer et al. (2002) followed the vocal development of two prelingually deaf children implanted at an early age (10 and 28 months). They showed that one of the children made rapid progress in vocal development, whereas the second developed more slowly. The authors concluded that early implantation did not impart superior speech abilities and that some children may need more specialized management, both prior and after the surgery to stimulate speech development. More recently, in a study conducted with prelingually deaf children implanted between 1 and 15 years of age, Harrison, Gordon and Mount (2005) concluded that there is no definite period of deafness after which a cochlear implant is of little or no value for the development of auditory and auditory-related functions, such as language. Consequently, extra-clinical factors such as cognitive influences and intelligence should be studied more extensively in order to better understand performance variability

following cochlear implantation (see also Pisoni & Cleary, 2004; Geers, Brenner, Nicholas, Uchanski, Tye-Murray & Tobey; 2002).

Combining results and practice

Results of this investigation are also important for both theory and practice. In most studies on language development, experienced judges are asked to qualify and/or transcribe children's speech production. Their judgement is then used to infer about population's perceptual performances, i.e. results that would be obtained by naïve listeners. Our data clearly showed that perceptual differences existed between these two types of judges. Consequently, cautions should be taken in the selection of judge listeners and level of expertise guided by the objectives of the investigation. For example, in studies aiming at understanding specific speech problems and/or language delay, experienced judges may represent the wisest option. On the other hand, in studies of normal speech and language development, naïve listeners may be to the most "ecological" choice as the children's main intention is to be understood by all members in their environment.

The present results also emphasize the impact of the linguistic unit being used in intelligibility studies. Most, if not all speech production studies with implanted children concluded with a steady increase in speech quality (Dawson, Blamey, Dettman, Rowland, Barker, Tobey, Busby, Cowan, & Clark, 1995; Mondain, Sillon, Vieu, Lanvin, Reuillard-Artieres, Tobey, & Uziel, 1997; Tobey, Angelette, Murchison, Nicosia, Sprague, Staller, Brimacombe, & Beiter, 1991; Tobey & Hasenstab, 1991). In these studies, sentences or words were the linguistic stimuli used for perceptual identification. However, when a smaller linguistic unit is chosen —such as a syllable in the current investigation — results are somewhat divergent: intelligibility does not steadily improve with time and may even decrease in the case of some vowels. Our results, indirectly, suggest that semantic content may enhance recognition scores. The impact of context on intelligibility has frequently been reported for both NH and hearing-impaired children (e.g. McGarr, 1983).

Conclusion

Contrary to the increased intelligibility seen when speech is produced in context, this is not the case when listeners with no previous experience are asked to identify syllables from the speech of the deaf. After three years of auditory experience with the implanted device, the intelligibility of speech produced by implanted children remained well below levels required for correct identification. Finally, age at implantation did not appear to play a significant role in predicting inter-rater agreement, thus emphasizing the need to focus on extraclinical variables to better understand the consequences of auditory restoration.

References

- Brosda, S. (1998). *Du babillage canonique à la naissance du contrôle des degrés de liberté des articulateurs*, Mémoire de Maîtrise, Institut de la Communication Parlée, Université Stendhal, Grenoble III.
- Blamey, P.J., Barry, J.G., & Jacq, P. (2001). Phonetic inventory development in young cochlear implant users 6 years post-operation. *Journal of Speech, Language and Hearing Research*, 44, 73-79.
- Davis, B.L., & MacNeilage, P.F. (1990). Acquisition of correct vowel production : a quantitative case study. *Journal of Speech and Hearing Research*, 33, 16-27.
- Dawson P.W., Blamey, P.J., Dettman, S.J., Rowland, L.C., Barker, E.J., Tobey, E.A., Busby, P.A., Cowan, R.S.C. & Clark, G.M. (1995). A clinical report on speech production of cochlear implant users. *Australian Journal of Audiology*. 15, 40.
- Ertmer, D. J., Young, N., Grohne, K., Mellon, J., Johnson, C., Corbett, K., & Saindon, K. (2002). Vocal development in young children with cochlear implants: Assessment and implications for intervention. *Language, Speech, and Hearing Services in the Schools*, 33, 185-196.
- Ertmer, D.J., & Mellon, J.A. (2001). Beginning to talk at 20 months: Early vocal development in a young cochlear implant recipient. *Journal of Speech and Hearing Research*, 44, 192-206.
- Ferguson, C. A. (1978). Learning to pronounce: The earliest stages of phonological development in the child. In F. D. Minifie & L. L. Lloyd (Eds.), *Communicative and cognitive abilities – Early behavioral assessment* (pp. 273–297). Baltimore: University Park Press.
- Fryauf-Bertschi, H., Tyler, R.S., Kelsay, D.M.R., Gantz, B.J. & Woodworth, G. (1997). Cochlear implant use by prelingually deafened children: the influences of age at implant and length of device use. *Journal of Speech and Hearing research*, 40, 183-199.
- Geers, A.E., & Tobey, A.E. (1995). Longitudinal comparison of the benefits of cochlear implants and tactile aids in a controlled educational setting. *Annals of Otology, Rhinology, & Laryngology*, 104, 328-329.

- Gold T (1980). Speech production in hearing-impaired children. *Journal of Communication Disorders*, 13, 397-418.
- Geers, A., Brenner, C., Nicholas, J., Uchanski, R., Tye-Murray, N., & Tobey, E. (2002). Rehabilitation factors contributing to implant benefit in children. *Annals of Otology, Rhinology, & Laryngology*, 189 (Suppl.), 127-130.
- Guenther, F.H., Satrajit S., Ghosh, and Jason A. Tourville (2006). Neural modeling and imaging of the cortical interactions underlying syllable production. *Brain and Language*, 96, 280- 301.
- Harrison, R.V., Gordon, K.A., Mount, R.J. (2005). Is there a critical period for cochlear implantation in congenitally deaf children? Analyses of hearing and speech perception performance after implantation. *Developmental Psychobiology*, 146, 252-261.
- Illg., A., Lesinski-Schiedat., A., Von Der Haar-Heise, S., Battmer, R.D., Goldring, J.E. & Lenarz, T. (1999). Speech perception results for children implanted with the CLARION Cochlear Implant at the Medical University of Hannover, *Annals of Otology, Rhinology and Laryngology*, 108, 93-98.
- Johnson, K. (1997). *Acoustic and Auditory Phonetics*. Oxford: Blackwell.
- Kent, R. D. & Miolo, G. (1995). Phonetic abilities in the first year of life. In P. Fletcher & B. MacWhinney (Eds.) *The handbook of child language* (pp. 303-334). Cambridge : Blackwell,.
- Kent, R.D. (1992). The biology of phonologic development. Dans C.A. Ferguson, L. Menn, C. Stoel-Gammon (Eds.) *Phonological Development : Models, Research, and Implications* (pp. 65-90). Timonium, MD: York Press.
- Kent, R. D., & Bauer, H. (1985). Vocalizations of 1-year-olds. *Journal of Child Language*, 12, 491-526.
- Kuhl, P. K. & Meltzoff, A. N. (1996). Infant vocalizations in response to speech: Vocal imitation and developmental change. *Journal of the Acoustical Society of America*, 100, 2425-2438.
- Kuhl, P. K. & Meltzoff, A. N. (1982). The bimodal perception of speech in infancy. *Science*, 218, 1138-1141.

- Lynch, M.P., Oller, K.D., Steffens, M. (1989). Development of speech-like vocalizations in a child with congenital absence of cochleas: The case of total deafness. *Applied Psycholinguistics*, 10, 315-333
- MacNeilage, P.; Studdert-Kennedy, M.; Lindblom, B.: Functional precursors to language and its lateralization. *American Journal of Physiology*, 246, 912-914.
- Markides, A. (1970). The speech of deaf and partially hearing children with special reference to factors affecting intelligibility. *British Journal of Disorders of Communication*, 5, 126-140.
- McGarr, N. (1983). The intelligibility of deaf speech to experienced and inexperienced listeners. *Journal of Speech and Hearing Research*. 26, 451-458.
- McGarr, N.S. & Harris, K.S. (1983). Articulatory control in a deaf speaker. In I. Hochberg, H.Levitt & M.J. Osberger (Eds), *Speech of the Hearing Impaired : research, training, and personnel preparation*, (pp. 75-95). Baltimore : University Park Press.
- Menn, L. (1983). Development of articulatory, phonetic, and phonological capabilities. Dans Butterworth B. (Eds.), *Language production* (Vol.2, pp. 3-50). London: Academic Press.
- Mondain, M., Sillon, M., Vieu, A., Lanvin, M., Reuillard-Artieres, F., Tobey, E., & Uziel, A. (1997). Speech perception skills and speech production intelligibility in French children with prelingual deafness and cochlear implants. *Archives of Otolaryngology- Head and Neck Surgery*, 123, 181-184.
- Monsen, R.B. (1983). Voice quality and speech intelligibility among deaf children. *American Annals of the Deaf*, 128, 12-24.
- Monsen, R.B. (1981). The oral speech intelligibility of hearing-impaired talkers. *Journal of Speech and Hearing Disorders*, 48, 286-296.
- Nicholas, J.G. & Geers, A.E (2004). Effect of age of cochlear implantation on receptive and expressive spoken language in 3-year old deaf children. *International Congress Series*, 1273, 340-343.
- Nikolopoulos, T.P., O'Donoghue, G.M., Archbold, S. (1999). Age at implantation: its importance in pediatric cochlear implantation *Laryngoscope*, 109, 595-599.
- Nikolopoulos, T.P., Archbold, S.M., O'Donoghue, G.M. (1999). The development of auditory perception in children following cochlear implantation. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 49, S189-S91.

- Nober, E.H. (1967). Vibrotactile sensitivity of deaf children to high intensity sound. *Laryngoscope*, 77, 2128-2146.
- O'Donoghue, G.M., Nikolopoulos, T.P., Archbold, S.M., & Tait, M. (1999). Cochlear implants in young children: The relationship between speech perception and speech intelligibility. *Ear and Hearing*, 20, 419-425.
- Osberger, M.J., Barker, M., Zimmerman-Phillips, S., Geier, L. (1999). Clinical trial of the CLARION Cochlear Implant in children, *Annals of Otology, Rhinology and Laryngology*, 108, 88-92.
- Osberger, M.J., Robbins, A.M., Todd, S.L., & Riley, A.I., Miyamoto, R.T. (1994). Speech intelligibility of children with cochlear implants. *Volta Review*, 96 (5), 169-180.
- Osberger, M.J., Maso, M., & Sam, L.S. (1993). Speech intelligibility of children with cochlear implants, tactile aids, or hearing aids. *Journal of Speech and Hearing Research*, 36, 186-203.
- Osberger, M.J., Miyamoto, R.T., Zimmerman-Phillips, S., Kemink, J.L., Stroer, B.S., Firszt, J.B., Novak, M.A. (1991). Independent evaluation of the speech perception abilities of children with the nucleus 22-channel cochlear implant system. *Ear and Hearing*, 12, 66-80.
- Pisoni, D.B. & Geers, A. (1998). Working memory in deaf children with cochlear implants: Correlations between digit span and measures of spoken language. Paper presented at the *Seventh Symposium on Cochlear Implants in Children*, Iowa City, IA.
- Pisoni, D.B. & Cleary, M. (2003). Measures of working memory span and verbal rehearsal speed in deaf children after cochlear implantation. *Ear and Hearing* 24 (1), S106-S120.
- Robert-Ribes, J. (1995). *Models of audiovisual integration*, PhD Thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- Serry, T.A., & Blamey, P.J. (1999). A 4-year investigation into phonetic inventory development in young cochlear implant users. *Journal of Speech, Language, and Hearing research*, 42, 141-154.
- Serry, T., Blamey, P., & Grogan, M. (1997) Phoneme Acquisition in the first four years of implant use. *American Journal of Otology*, 18 (Suppl.) 122- 124.
- Shriberg, L.D., & Lof, G.L. (1991). Reliability studies in broad and narrow phonetic transcription. *Clinical Linguistics & Phonetics*, 5, 225-279.

- Sitler, R.W., Schiavetti, N. Metz, D. E. (1983). Contextual effects in the measurement of hearing-impaired speakers' intelligibility. *Journal of Speech and Hearing research*, 26, 30-35.
- Smith, C.R. (1975). Residual hearing and speech production in deaf children. *Journal of Speech and Hearing Research*, 18, 795-811.
- Spencer, L. J., Tye-Murray, N., & Tomblin, J. B. (1998). The production of English inflectional morphology, speech production and listening performance in children with cochlear implants. *Ear & Hearing*, 19, 310-318.
- Svirsky, M., Robbins, A.M., Kirk, K.I., Pisoni, D.B., & Miyamoto, R.T. (2000). Language development in profoundly deaf children with cochlear implants. *Psychological Science*, 11, 153-158.
- Tobey EA, Geers AE, Brenner C, Altuna D, Gabbert G (2003). Factors associated with development of speech production skills in children implanted by age five. *Ear and Hearing*, 24 (1), S36-S45.
- Tobey, E., Angelette, S., Murchison, C., Nicosia, J., Sprague, S., Staller, S., Brimacombe, J.A., & Beiter, A.L. (1991). Speech production performance in children with multichannel cochlear implants. *American Journal of Otology*, 12(Suppl.), 165-173.
- Tobey, E.A. & Hasenstab, S. (1991). Effects of a Nucleus multichannel cochlear implant upon speech production in children. *Ear and Hearing*, 12, 48S-54S.
- Tye-Murray, Spencer, & Woodworth (1995). Acquisition of speech by children who have prolonged cochlear implant experience. *Journal of Speech and Hearing Research*, 38, 327-337.
- Tye-Murray, N., & Iler Kirk, K. (1993). Vowel and diphthong production by young users of cochlear implants and the relationship between the Phonetic Level Evaluation and spontaneous speech. *Journal of Speech and Hearing Research*, 36, 488-502.
- Uziel, A., Reuillard-Artieres, F., Sillon, M., Vieu, A., Mondain, M., Piron, J.-P. & Tobey, E. (1996). Speech perception performance in prelingually deafened French children using the Nucleus multichannel cochlear implant. *American Journal of Otology*, 17, 559-568.
- Wang, N.M., Huang, T.S., Wu, C.-M., Kirk, K.I. (2007). *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 71, 1775-1782.

- Warren, R.M., & Obusek, C.J. (1971). Speech perception and phonemic restorations. *Perception & Psychophysics*, 9, 358-362.
- Yoshinaga-Itano, C. (2002) Cochlear implantation below 12 months of age: Challenges and Considerations. In S. Gillis (Ed.) *Antwerp Papers in Linguistics*, 102, 61-76.

Table 1.

Clinical and demographic characteristics of implanted participants

Subject	Gender	Age at diagnosis	Etiology	DHL	Age at implantation
1	M	3	Unknown	III	30
2	F	28	Unknown	III	73
3	F	14	Unknown	II	76
4	F	5	Unknown	III	46
5	F	4	Hereditary	III	28
6	F	16	Unknown	III	48
7	F	14	Unknown	III	75
8	M	14	Unknown	III	48
9	F	6	Unknown	III	59
10	F	13	Unknown	I	33
11	M	11	Hereditary	III	72
12	M	11	Unknown	II	50

DHL: Degree of hearing loss

DHL 1: average of 90-100 dB hearing loss

DHL 2: 100-110 dB hearing loss

DHL 3: over 110 dB hearing loss

Table 2

Percentage of agreement between naïve and experienced listeners for vowels

INEXPERIENCED/NAIVE

E X P E R I E N C E D	Area 1	MPI*	Area 1	Area 2	Area 3	Others
		6	80.0%	2.0%	4.0%	13.0%
		18	88.0%	1.0%	3.0%	8.0%
		36	76.0 %	3.0%	5.0%	16.0%
	Area 2	6	1.0%	84.0%	8.0%	7.0%
		18	0%	79.0%	14.0%	6.0%
		36	2.0%	77.0%	10.0%	10.0%
	Area 3	6	3.0%	6.0%	86.0%	5.0%
		18	1.0%	5.0%	93.3%	2.0%
		36	2.0%	4.0%	91.0%	4.0%

* : Months post-implantation

Table 3

Percentage of agreement between naïve and experienced listeners for consonants

INEXPERIENCED/NAIVE

E X P E R I E N C E D	Area 1	MPI*	Area 1	Area 2	Area 3	Others
		6	63.0%	13.0%	15.0%	10.0%
		18	69.0%	10.0%	14.0%	7.0%
		36	56.0%	20.0%	16.0%	8.0%
	Area 2	6	11.0%	58.0%	25.0%	7.0%
		18	16.0%	57.0%	21.0%	6.0%
		36	14.0%	60.0%	19.0%	8.0%
	Area 3	6	7.0%	18.0%	68.0%	6.0%
		18	15.0%	15.0%	62.0%	7.0%
		36	5.0%	20.0%	69.0%	6.0%

* : Months post-implantation

CHAPITRE III

DISCUSSION GÉNÉRALE

L'objectif premier de cette recherche était de déterminer comment de jeunes enfants privés d'afférences auditives acquièrent la parole suite à une implantation cochléaire. Un second objectif était de mettre en lumière le rôle de l'âge à l'implantation — un rôle apparemment important en raison des questions de plasticité cérébrale et de périodes sensibles associées développement des capacités expressives des enfants. Les résultats obtenus révèlent des patrons de développement post-implant complexes qui reflètent les conditions sensorielles uniques dans lesquelles ces enfants évoluent avant et après cette restauration sensorielle. Ils montrent aussi que l'âge auquel ces enfants sont implantés ne semble pas jouer le rôle primordial que plusieurs autres études lui accordent.

3.1 Acquisition de la parole post-implantation

A ce jour, peu d'études ont suivi dans le temps un large groupe d'enfants implantés. En observant des enfants sourds pré-linguaux à 18 et 36 mois postimplantation il a été possible de mettre en évidence une amélioration graduelle de leurs habiletés phonétiques et phonologiques, mais pas de leur intelligibilité. Les progrès phonétiques et phonologiques observés concordent avec bon nombre de travaux antérieurs. En effet, il apparaît que l'expérience avec le port de la prothèse cochléaire est l'un des facteurs les plus importants dans la qualité des performances expressives post-implantatoires (e.g. Tye-Murray et al. 1995)

Dans la première étude portant sur le développement phonologique et phonétique à 18 mois post-implantation, on remarque des progrès manifestes dès les premiers mois qui suivent l'intervention chirurgicale. Une telle amélioration si tôt après la restauration sensorielle peut être due au fait que le retard linguistique initial était considérable et donc plus facile à combler. Une explication alternative pourrait être liée au fait que ces enfants, alors plus jeunes, auraient pu se trouver dans une période où les systèmes cérébraux sont tout particulièrement sensibles au développement du langage en raison d'une plus grande plasticité (Tomblin, Barker, Spencer, Zhang, Gantz, 2005)

L'émergence de phonèmes peu visibles sur les lèvres, telles que les consonnes vélaires, ou localisées dans les hautes fréquences telles que les fricatives et les voyelles antérieures hautes, suggère que ces enfants font graduellement usage de l'information auditive que leur procure la prothèse cochléaire dans leur production. Toutefois, la trajectoire que suit leur développement conserve certaines traces de leur expérience sensorielle unique. Ce phénomène se manifeste principalement par l'utilisation, pour guider leur production, d'indices extra-auditifs comme la vision et les indices tactiles et kinesthésiques. Une telle tendance caractérise la parole des enfants atteints de surdité, qu'ils soient implantés ou non (Gold, 1980). Ces indices s'avèrent toutefois insuffisants pour transmettre toutes les informations nécessaires à l'acquisition et à la maîtrise de tous les phonèmes vocaliques et consonantiques (Kuhl & Meltzoff, 1984).

La seconde étude avait comme principal objectif d'étudier l'évolution de l'intelligibilité au cours des trois premières années de restauration sensorielle. L'intelligibilité était définie selon l'accord inter-juges entre auditeurs expérimentés et inexpérimentés et non en termes de rations cibles attendues/cibles produites comme le font généralement les études du genre. Une telle approche a été développée afin d'utiliser les échantillons de discours spontané qui représentent plus fidèlement les capacités expressives de ces enfants. Les résultats obtenus démontrent des progrès en ce qui concerne l'intelligibilité de certaines voyelles, telles que le /a/ mais des améliorations non-significatives pour les consonnes bien que celles choisies aient été les occlusives censées être maîtrisées les premières chez les enfants (Nittrouer, 1993). De tels résultats s'écartent de ceux généralement retrouvés dans la

littérature, à savoir des améliorations notoires dans l'intelligibilité à mesure que l'expérience auditive augmente (e.g. Flipsen Jr, 2008; Calmels, Saliba, Wanna, Cochard, Fillaux, Deguine, & Fraysse, 2004; Mondain, Sillon, Vieu, Lanvin, Reuillard-Artieres, Tobey, & Uziel, 1997; Tobey & Hasenstab, 1991).

On peut émettre quelques hypothèses pour expliquer ces progrès restreints. Une première, d'ordre méthodologique, est que les stimuli utilisés ici, à la différence de ceux employés dans les autres études, sont des syllabes présentées hors contexte plutôt que des mots ou des phrases. Il est possible que l'information auditive fournie par l'implant cochléaire ne soit pas suffisamment précise pour permettre un raffinement articuloire permettant à des productions présentées sans l'effet facilitateur du contexte d'être intelligible pour des locuteurs d'expériences diverses. En effet, l'implant ne donne pas accès à toutes les fréquences acoustiques du spectre de la parole, comme le font les cellules ciliées de l'oreille interne. Les 16 à 24 électrodes de l'implant cochléaire permettent donc une perception de la parole caractérisée en termes de pavés de reconnaissance qui est susceptible de se répercuter par la suite dans la précision des stratégies articuloires développées. Une seconde hypothèse s'explique par le fait que ces enfants sourds devenus sourds en très bas âge, n'aient pas été en mesure de traverser certaines étapes clés du développement auditif et perceptuel. En effet, durant sa première année de vie, le système perceptuel du bébé subit de nombreuses transformations faisant en sorte d'orienter le jeune enfant vers l'acquisition de sa langue maternelle (pour une revue, voir Werker et Tess, 2005). Étant donné la forte corrélation existant entre la qualité de la perception de la parole et celle de la production (Perkell, Guenther, Lane et al. 2004), l'absence d'une telle réorganisation perceptuelle pourrait empêcher ces enfants d'accéder, suite à l'implantation cochléaire, à toutes les subtilités qu'implique la perception fine de la parole, ce qui se répercuteraient directement dans la précision de leurs stratégies articuloires qui demeurerait peu précises et donc peu intelligibles si un contexte favorisant la compréhension est absent.

3.2 Influence de l'âge à l'implantation

Les résultats de la présente étude montrent une faible corrélation entre l'âge à

l'implantation et les progrès linguistiques suite à la restauration sensorielle. On observe même une tendance inverse, chez certains enfants. Plus précisément, dans l'étude d'intelligibilité, les enfants implantés tardivement présentent des capacités expressives mieux développées que celles des enfants implantés plus précocement. De tels résultats bien que plus rares, concordent néanmoins avec ceux d'autres travaux qui ne peuvent mettre en évidence le rôle significatif de l'âge à l'implantation (Anderson et al., 2004, Sharma, Dorman, Spahr, 2002,). Par exemple, Geers (2004) conclut que pour des enfants implantés entre 2 et 4 ans, la précocité de l'implantation ne peut garantir de meilleures performances langagières. De la même manière, Tobey, Geers, Brenner, Altuna et Gabbert (2003) qui ont effectué la recherche dénombrant le plus de participants à ce jour (181), n'ont pu mettre en évidence le rôle de cette variable, des facteurs cognitifs tels que ceux liés à l'intelligence non-verbale s'avérant plus importants.

De tels résultats suggèrent la présence d'une plasticité cérébrale se maintenant dans le temps. En effet, de meilleures performances chez les enfants implantés plus jeunes auraient suggéré l'existence d'une période critique caractérisée par une plasticité cérébrale suffisamment importante pour compenser, même partiellement, les effets de la privation sensorielle et ainsi soutenir l'élaboration du langage oral. Or les résultats de la présente étude ou ceux d'autres travaux qui montrent que la précocité à l'accès à l'information auditive via une stimulation électrique ne favorise pas systématiquement plus un développement supérieur des capacités linguistiques (Harrison et al., 2005; Chin, Tsai, and Gao, 2003; Huttenlocher, 1990) suggèrent que d'autres facteurs, en particulier l'expérience et l'environnement, jouent un rôle plus considérable que ceux liés à la maturation.

De tels résultats vont ainsi à l'encontre des théories de la plasticité cérébrale fixe et rigide qui ne voient aucune alternative aux contraintes biologiques ou fixées par l'âge dans le développement de la parole et du langage. Une telle perception implique également que le développement normal dépend de certaines expériences qui doivent obligatoirement se produire durant une période critique. En parallèle, une telle conception implique que les

possibilités de « réadapter » ce développement anormal sont sévèrement compromises si cette fenêtre temporelle est passée. Or les résultats de l'étude actuelle qui démontrent que des enfants implantés aussi tardivement que 6 ans parviennent à acquérir des voyelles et des consonnes alors que leur pairs normo-entendants maîtrisent la plupart des phonèmes de leur langue maternelle entre 4 et 5 ans suggèrent plutôt l'adaptation continue des stratégies d'organisation, de réorganisation et de traitement de l'information du cerveau selon les expériences et les conditions de l'environnement dans lesquelles ce dernier évolue. Une telle perspective est d'ailleurs avancée par divers auteurs dont Cohen & Elsabbagh (2006) et Karmiloff-Smith (1998) pour expliquer les profils comportementaux uniques de patients atteints de troubles neurodéveloppementaux, tel que le syndrome de Williams. Elle offre également un cadre de référence permettant d'approfondir la compréhension de certains résultats de cette recherche. Ainsi, il est possible que les progrès observés chez les enfants implantés en bas âge soient liés à leur capacité à apprendre de manière incidente, i.e. sans enseignement formel ni volonté consciente d'apprendre. Cette forme d'apprentissage favorise une compréhension et une généralisation des connaissances acquises à d'autres situations similaires (Robbins et al., 1999). À l'inverse, les enfants implantés plus tardivement, donc plus vieux, ont une plus grande maturité mentale, sociale et cognitive. Ils peuvent également compter des capacités représentationnelles plus raffinées, de meilleures habiletés exécutives et une mémoire de travail plus efficace, etc... De telles aptitudes ne sont pas directement liées au langage, mais sont néanmoins essentielles au développement des capacités expressives (Diamond, 1991). De plus, leurs stratégies de compréhension non-verbale, plus sophistiquées que celles de leurs jeunes pairs, leur permettent de tirer parti de ces capacités exécutives pour apprendre à parler. Le développement linguistique des enfants après l'implantation peut donc être vu comme étant le reflet d'interactions entre des facteurs externes et internes à l'enfant, mais également comme l'implication de processus cognitifs qui diffèrent selon l'âge mais qui sont néanmoins présents dans tout processus de développement et d'apprentissage. L'atypicité de l'expérience initiale semble donc influencer les mécanismes qui seront en action et qui sous-tendront l'apprentissage sans toutefois empêcher que ne se déroule cet apprentissage.

Le peu d'influence du rôle de l'âge à l'implantation sur les performances linguistiques montre que ce n'est pas le temps qui contrôle le développement dans les divers systèmes dont le système nerveux. Tel que le suggèrent Armstrong, Brunet, He, Nishimura, Poole, Spector (2006), l'âge et le temps représentent assurément des données de comparaison et de description intéressantes dans les études impliquant une notion de développement, mais ne devraient pas être considérées comme des facteurs expliquant le développement en soi. Il est ainsi essentiel de s'interroger non plus sur l'âge auquel un organisme est ou n'est plus en mesure de bénéficier de l'expérience (donc l'identification des limites temporelles d'une plasticité cérébrale), mais plutôt de considérer la trajectoire développementale qu'emprunte un organisme exposé à des conditions uniques ainsi qu'aux mécanismes impliqués dans les changements qui sont observés.

S'efforcer de mieux comprendre les mécanismes et les facteurs impliqués dans le développement permet aussi l'élaboration de recommandations plus adaptées à la rééducation de ces enfants. En effet, accorder une trop grande importance à l'âge de l'enfant implanté résulte en une vision tronquée des réelles possibilités qui lui sont offertes. Les résultats de la présente recherche, tout comme ceux d'autres travaux, suggèrent une réalité tout autre. Par exemple, mieux comprendre la trajectoire que suit un développement, permet l'élaboration de programmes de réhabilitation qui planifient avec plus de justesse la manière dont les apprentissages doivent être introduits, mais également les processus qui doivent être renforcés et développés. Par rapport à l'implant cochléaire, la décision d'implanter ou non un enfant devrait être prise en faisant une analyse des coûts/bénéfices du traitement non plus basée sur l'âge de l'enfant, mais davantage sur les acquis pré-implantation et les apprentissages post-implantation qu'il aura à faire (son développement cognitif global pré-implant. De plus, les parents et les professionnels de la santé, qui représentent les décideurs en matière d'implantation pédiatrique doivent tenir compte des variables d'influence dans leur décision d'implanter ou non. Le fait que les variables environnementales occupent un rôle prépondérant dans l'émergence de la parole à la suite de la restauration sensorielle est encourageant, puisqu'il s'agit de variables sur lesquelles la plupart des intervenants peuvent agir. Plus précisément, les familles doivent être sensibilisées à l'importance de leur implication et d'un milieu de vie enrichi pour la réussite linguistique de leur enfant implanté.

Spencer (2004) ainsi que Geers et Brenner (2003) soulignent d'ailleurs l'impact positif d'un milieu familial motivé sur le développement des capacités expressives d'enfants implantés.

3.3 Conclusion

L'influence de l'implant cochléaire sur le développement de la parole est complexe puisqu'il demeure difficile de séparer la contribution des informations acoustiques de celles provenant de la maturation normale et des facteurs liés à la rééducation. Lorsque la performance post-implantatoire est considérée, il importe de retenir que les enfants implantés n'entendent toujours pas « normalement » à la suite de la restauration sensorielle. Ils reçoivent certes un signal sonore amélioré, mais qui demeure toujours sous-optimal pour le traitement de la parole à des intensités conversationnelles. Une perte auditive, même minime, est associée à des troubles langagiers et à des difficultés académiques (Bess, Dodd-Murphy, & Parker, 1998; Davis, 1990). C'est la raison pour laquelle il est primordial de considérer les gains post-implantatoires à la lumière des impacts que procurent également l'intervention post-chirurgicale, la stimulation langagière et le support familial.

Par ailleurs, recevoir un implant cochléaire améliore les capacités expressives mais n'équivaut pas à reprendre à zéro la trajectoire développementale. Ainsi, les conditions sensorielles uniques ayant prévalu durant une période plus ou moins longue laissent certaines traces qui orientent la manière dont ces enfants apprennent par la suite à parler. Si une normalisation graduelle des patrons de développement est observée à mesure que ne s'accroît l'expérience auditive, certaines stratégies de production reliées à la période de surdité demeurent néanmoins présentes. Ainsi, leur cerveau semble avoir intégré l'information acoustique artificielle en préservant toutefois certaines des habitudes développées durant leur période de privation auditive.

Finalement, en ce qui concerne l'importante variabilité observée dans les performances suite à l'implantation cochléaire, les résultats de la présente recherche qui montrent le peu d'impact de l'âge à l'implantation, indiquent qu'il faut repenser l'interprétation des effets d'une telle restauration sensorielle rapportée dans plusieurs travaux antérieurs. En effet, la plupart des études se sont intéressées aux performances attendues à la

suite de cette restauration sensorielle ainsi qu'à déterminer une période où la stimulation ne contribuerait plus efficacement au développement de la parole. Or, préciser la nature des processus cognitifs et des ressources de traitement de l'information qui interviennent entre l'arrivée de l'input auditif et la réponse expressive chez ces enfants permettrait de révéler de nouveaux prédicteurs de performance langagière et de mieux interpréter la variabilité observée. Très peu d'études ont été faites à ce jour sur l'apprentissage perceptuel, le développement conceptuel, les fonctions exécutives dont la planification, l'intégration visuo-spatiale, les habiletés de séquentialisation, la conscience phonologique, la catégorisation et la mémoire de travail des enfants implantés. Pourtant ces habiletés sont des facteurs clés dans l'acquisition et la production de la parole. Les quelques recherches qui s'y sont attardées avancent que les enfants sourds présentent une lenteur au plan de la répétition subvocale et de l'exploration des éléments phonologiques en mémoire à court-terme. Les enfants implantés ont également des empanns directs et indirects plus courts pour le matériel verbal et spatial (Cleary, Pisoni, & Geers, 2001). Les réseaux attentionnels sous-jacents au traitement de l'information auditive seraient donc affectés par la privation sensorielle. Des recherches plus poussées à ce niveau permettraient de découvrir si les problèmes expressifs sont des conséquences directes des déficits perceptifs ou plutôt s'ils sont influencés par des processus cognitifs plus généraux. Ainsi, considérer les différences de capacités expressives à la lumière de facteurs perceptuels, cognitifs et linguistiques et non en termes d'âge à l'implantation et de période critique stricte constitue sans doute une direction prometteuse.

APPENDICE A
 FORMULAIRE DE CONSENTEMENT

Université du Québec à Montréal
Département de psychologie

Titre du projet: Évolution de l'intelligibilité de la parole d'enfants sourds pré-lingaux ayant reçu un implant cochléaire.

Responsable: Marie-Eve Bouchard, étudiante au doctorat en psychologie

Superviseurs : Henri Cohen, département de psychologie

Lucie Ménard, département de linguistique et de didactique des langues

Formulaire de consentement

J'accepte de me porter volontaire pour l'étude sur le développement de l'intelligibilité, menée sous la direction de Marie-Eve Bouchard, et ayant pour but principal d'étudier l'évolution de l'intelligibilité de la parole d'enfants sourds ayant reçu un implant cochléaire. Ce projet de recherche est financé par le Center for Research on Language, Mind and Brain (CRLMB) ainsi que par le Conseil de Recherches en Sciences Humaines (CRSH).

Ma collaboration à cette étude consistera à écouter des sons, à identifier la voyelle ou la consonne du français entendue et à juger de la qualité du segment entendu. Pour ce, je devrai sélectionner un bouton à l'écran à l'aide de la souris. Ce test ne comporte aucune bonne ou mauvaise réponse.

Les tests se dérouleront dans un endroit calme, dans un lieu qui me convient, au cours des prochains mois. Les tests pourront se dérouler en une ou deux séances, selon mon choix, chacune de ces séances ayant une durée approximative de 1 heure 30, en excluant le temps consacré aux pauses.

Le matériel utilisé sera un ordinateur portable, un casque d'écoute et/ou des enceintes acoustiques.

Je reconnais que je recevrai la somme de 20.00\$ pour ma participation à cette étude et j'accepte d'y participer volontairement. Je comprends que je pourrai me retirer de l'étude à tout moment pour des motifs qui me concernent. Je reconnais que la responsable pourra interrompre ma participation en cours en tout temps après qu'elle aura débuté.

Il est convenu que les renseignements contenus dans mon dossier de recherche (mesures, données sociologiques) pourront être utilisés par la responsable de l'étude, à la condition cependant que les éléments qui pourraient être de nature confidentielle ne soient

pas divulgués dans le public d'une façon telle que l'on puisse m'identifier. J'accepte également que les enregistrements soient conservés pour des recherches ultérieures.

Signature du participant:
Date:

Signature de la responsable:
Date:

N.B. : *Prendre note que toute question, critique ou plainte peut être adressée à Marie-Eve Bouchard (987-3000 poste 1700). Si votre plainte ne peut être réglée directement avec la chercheuse principale, vous pouvez faire valoir vos droits par écrit auprès du Comité institutionnel d'éthique de la recherche avec des êtres humains de l'Université du Québec à Montréal (secrétariat : 987-3000 poste 773).*

APPENDICE B

ATTESTATION DE COMPENSATION

TEST DE PERCEPTION

Dans le cadre du projet : « **Évolution de l'intelligibilité de la parole d'enfants sourds pré-linguistiques ayant reçu un implant cochléaire** ».

PARTICIPANT

Je certifie avoir reçu une compensation sous forme d'argent d'une valeur de 20.00\$ pour l'ensemble de ma participation à cette étude.

Signature : _____

Date : _____

Responsable de la recherche

Marie-Eve Bouchard
Étudiante au doctorat en psychologie
Département de psychologie
Tél : 987-3000, poste 1700

Superviseurs :

Dr. Lucie Ménard
Professeur
Département de linguistique et de didactique des langues

Dr. Henri Cohen
Professeur
Département de psychologie

BIBLIOGRAPHIE

- Allen, C., Nikolopoulos, T.P., & O'Donoghue, G.M. (1998). Speech intelligibility in children after cochlear implantation. *The American Journal of Otology*, 19, 742-746.
- American Speech-Language Hearing Association (2004). Technical report: cochlear implants. *ASHA Supplement*, 24, in press.
- Anderson, I., Weichbold, V., D'Haese, P.S.C., Szuchnik, J., Quevedo, M.S., Martin, J., Dieler, W.S., & Phillips, L (2004). Cochlear implantation in children under the age of two-what do the outcomes show us? *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 84, 425-431.
- Anderson, J., Morgan, J. L., White, K. S. (2003). A Statistical Basis for Speech Sound Discrimination. *Language and Speech*, 46, 155-182.
- Archbold, S.M., Nikolopoulos, T.P., Tait, M., O'Donoghue, G.M., Lutman, M.E., & Gregory, S. (2000). Approach to communication, speech perception, and intelligibility after paediatric cochlear implantation. *British Journal of Audiology*, 34 (4), 254-264.
- Armstrong, V.L., Brunet, P.M., He, C., Nishimura, M., Poole, H.L., Spector, F.J. (2006). What is so critical?: A commentary on the reexamination of critical periods. *Developmental Psychobiology*, 48 (4): 326-336.
- Baillargeon, R., & Graber, M. (1988). Evidence of location memory in 8-month-old infants. *Cognition*, 20, 191-208.
- Barr, R., Hayne, H. (2003). It's not what you know it's who you know: Older siblings facilitate imitation during infancy. *International Journal of Early Years Education*, 11, 7-21.
- Basser, L.S. (1962). Hemiplegia of Early Onset and the Faculty of Speech with Special Reference to the Effects of Hemispherectomy, *Brain*, 85, 427-60.
- Bateson, P. (1979). How do sensitive periods arise and what are they for? *Animal Behaviour*, 27, 470-486.
- Bergeron, A.M., Henry, F. (1994). *GIRAFE: guide d'intervention en réadaptation auditive: formule de l'enfant*. Coll. Méridien Santé-Médecine. Ed: Édition du Méridien, Laval, 407p.

- Bernstein, N. (1967). *The Coordination and Regulation of Movements*. Oxford, Pergamon.
- Bertoncini, J., Bijeljac-Babic, R., Jusczyk, P. W., Kennedy, L. & Mehler, J. (1988). An Investigation of Young Infants' Perceptual Representations of Speech Sounds, *Journal of Experimental Psychology : General*, 117, 21-33.
- Bertram, B. & Pad, D. (1995). Importance of auditory-verbal education and parents' participation after cochlear implantation of very young children. *Annals of Otolaryngology, Rhinology, & Laryngology*, 106 (Suppl.), 17-19.
- Bess, F.H., Dodd-Murphy, J., & Parker, R.A. (1998). Children with minimal sensorineural hearing loss: Prevalence, educational, and functional status. *Ear and Hearing*, 19, 339-354.
- Bishop, B. & Mogford, K.(1988). *Language Development in Exceptional Circumstances*. Edinburgh, New York, Churchill Livingstone, 313p
- Bizaguet, E. (2003)La prothèse auditive numérique et l'implantation », *Connaissances Surdités, la revue d'ACFOS*, 1, 123-131.
- Blamey, P.J., Barry, J.G., & Jacq, P. (2001). Phonetic inventory development in young cochlear implant users 6 years post-operation. *Journal of Speech, Language and Hearing Research*, 44, 73-79.
- Bloom, L., Lightbown, P., Hood, L. (1975). *Structure and variation in child language*. Monographs of the Society for Research in Child Development, 40 (série no. 160). Réédité dans L. Bloom et.al. (1991), *Language development from two to three*. New York: Cambridge University Press, pp. 41-85.
- Bowlby, J. (1969). *Attachment and loss: Attachment* (Vol. 1). New York: Basic
- Boysson-Bardies, B. de, (1999). *Comment la parole vient aux enfants ?*, éditions Odile Jacob, Paris.
- Brosda, S., 1999, *De la variation dans le babillage canonique : l'apprentissage sensori-moteur*, Mémoire de DEA, Institut de la Communication Parlée, Université Stendhal, Grenoble III.
- Brosda, S., 1998, *Du babillage canonique à la naissance du contrôle des degrés de liberté des articulateurs*, Mémoire de Maîtrise, Institut de la Communication Parlée, Université Stendhal, Grenoble III

- Bruner, J.S. (1983). The acquisition of pragmatic commitments. Dans R.M. Golinkoff (Ed.) *The transition from prelinguistic to linguistic communication : issues and implications* (27-42). Hillsdale, NJ, Lawrence Erlbaum Associates.
- Buccino, G., Lui, F., Canessa, N., Patteri, I., Lagravinese, G., Benuzzi, F., Porro, C.A., Rizzolatti, G. (2004) Neural circuits involved in the recognition of actions performed by nonconspecifics: An fMRI study. *J Cogn. Neurosci.* 16: 114-126.
- Buccino, G., Binkofski, F., Fink, G.R., Fadiga, L., Fogassi, L., Gallese, V., Seitz, R.J., Zilles, K., Rizzolatti, G., & Freund, H.-J. (2001). Action observation activates premotor and parietal areas in a somatotopic manner: an fMRI study. *European Journal of Neuroscience*, 13, 400-404.
- Buhr, R.D. (1980). The emergence of vowels in an infant. *Journal of Speech and Hearing Research*, 23, 73-94.
- Busby, P.A., Tong, Y.C., & Clark, G.M. (1992). Psychophysical studies using a multiple-electrode cochlear implant in patients who were deafened early in life. *Audiology*, 31, 2, 95-111.
- Calmels, M.-N., Saliba, I., Wanna, G., Cochard, N., Fillaux, J., Deguine, O., Fraysse, B. (2004). Speech perception and speech intelligibility in children after cochlear implantation. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 68, 347-351.
- Calvert, G.A., Bullmore, E.T., Brammer, M.J., Campbell, R., Williams, S.C., McGuire, P.K., Woodruff, P.W., Iversen, S.D., & David, A.S. (1997). Activation of auditory cortex during silent lipreading. *Science*, 276, 593-596.
- Chin S.B. (2003). Children's consonant inventories after extended cochlear implant use. *Journal of Speech Language and Hearing Research*, 46, 849-62.
- Chin S.B., Tsai P.L., Gao S. (2003). Connected speech intelligibility of children with cochlear implants and children with normal hearing. *American Journal of Speech Language Pathology* 12, 440-51.
- Chin, S.B., Pisoni, D.B. (2000). A phonological system at two years after cochlear implantation. *Clinical Linguistics and Phonetics*, 14, 53-73.

- Chouard, C.H., Josset, P., Meyer, B., Buche, J.F. (1983). The effect of the acoustic nerve chronic electric stimulation upon the guinea pig cochlear nucleus development. *95(5-6):639-45.*
- Cleary, M., Pisoni, D., & Geers, A. (2001). Some measures of verbal and spatial working memory in eight- and nine- year- old hearing impaired children with cochlear implants. *Ear and Hearing, 22*, 395-411.
- Collet, L. (1990). Maturation et développement de l'audition chez l'humain : données récentes. *Bulletin d'Audiophonologie : Annales Scientifiques, Médecine et Pharmacie. Université de Franche-Comté, 134*, 147-152
- Crystal, D. (1981). *Clinical linguistics*. Wein: Springer-Verlag.
- Curtiss S (1989). Issues in language acquisition relevant to cochlear implants in young children. Dans Eds: Owens E, Kessler DK. *Cochlear Implant in Young Children Deaf Children*. Massachussetts: Little Brown and Company: pp. 293-305.
- Curtiss, S.R. (1977). *Genie : a psycholinguistic study of a modern-day wild child*. New York Academic Press.
- Davis, B.L., & MacNeilage, P.F. (1990). Acquisition of correct vowel production : a quantitative case study. *Journal of Speech and Hearing Research, 33*, 16-27.
- DeCasper, A. J., & Spence, M. J. (1986). Prenatal maternal speech influences newborns' perception of speech sounds. *Infant Behavior and Development, 9*, 133-150
- Diamond, A. (1991). Neuropsychological insight into the meaning of object concept development. Dans S. Carey, & R. Gelman (Eds.), *The epigenesis of mind. Essays on biology and cognition* (pp.67-110). New Jersey: Lawrence Erlbaum.
- Diller, K. (1981). Natural Methods' of foreign language teaching: Can they exist? What criteria must they meet? Dans H. Winnitz (Ed.), *Native language and foreign language acquisition. Annals of the New York Academy of Sciences, 379*, 75-91.
- Dodd, B. (1976). The phonological systems of deaf children, *Journal of Speech and Hearing Disorders, 41*, 2, 185-198.
- Dyson, A. (1988). Phonetic inventories of 2- and 3-year-old children. *Journal of Speech and Hearing Disorders, 53*, 89-93.
- Eimas, P. D., Siqueland, E. R., Jusczyk, P., & Vigorito, J. (1971). Speech perception in infants. *Science, 171*, 303-306

- Eisenberg, L.S., Berliner, K.I., Thielemeyer, M.A., Kirk, K.I., Tiber, N. (1983). Cochlear implants in children. *Ear and Hearing*, 4, 41-50.
- El-Hakim, H., Abdolell, M., Mount, R.J., Papsin, B.C., Harrison, R.V. (2002). Influence of age at implantation and of residual hearing on speech outcome measures after cochlear implantation: binary partitioning analysis. Eighth symposium on cochlear implants in children. *Annals of Otolaryngology, Rhinology and Laryngology*, 111 (suppl 189), 102-108.
- Erber, N.P. (1983). Speech perception and speech development in hearing-impaired children. Dans I Hochberg, H Levitt & M.J. Osberger (eds), *Speech of the Hearing-Impaired: research, training, and personnel preparation*, Baltimore: University Park Press, chap 7, pp 131-145
- Erber, N.P. (1975). Auditory-visual perception of speech. *Journal of Speech and Hearing Disorders*, 40, 481-92.
- Ertmer, D.J., Strong, L.M., & Sadagopan, N. (2003). Beginning to communicate after cochlear implantation: oral language development in a young child. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 46, 328-340.
- Ertmer, D. J., Young, N., Grohne, K., Mellon, J., Johnson, C., Corbett, K., & Saindon, K. (2002). Vocal development in young children with cochlear implants: Assessment and implications for intervention. *Language, Speech, and Hearing Services in the Schools*, 33, 185-196
- Ertmer, D.J. (2001). Emergence of a vowel system in a young cochlear implant recipient. *Journal of Speech, Language and Hearing research*, 44, 803-813.
- Ertmer, D.J., & Mellon, J.A. (2001). Beginning to talk at 20 months: Early vocal development in a young cochlear implant recipient. *Journal of Speech and Hearing Research*, 44, 192-206.
- Ertmer D.J., Kirk K.I., Sehgal S.T., Riley A.I., Osberger M.J. (1997). A comparison of vowel production by children with multichannel cochlear implants or tactile aids: perceptual evidence. *Ear and Hearing*, 18(4), 307-15
- Ewersten, H.W., & Birk-Nielson, H. (1971). A comparative analysis of the audio visual, auditive, and visual perception of speech. *Acta Otolaryngology*, 72, 201-205.

- Ewing, A. & Ewing, E.C. (1984). *Teaching deaf children to talk*. Manchester University Press
- Flipsen Jr., P. (2008). Intelligibility of spontaneous conversational speech produced by children with cochlear implants : A review. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 72, 559-564.
- Friederici, A. D., Steinhauer, K., & Pfeifer, E. (2002). Brain signatures of artificial language processing: Evidence challenging the critical period hypothesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences, U.S.A.*, 99, 529-534
- Fryauf-Bertschi, H., Tyler, R.S., Kelsay, D.M.R., & Gantz, B.J. (1997). Cochlear implant use by prelingually deafened children: the influences of age at implant and length of device use. *Journal of Speech and Hearing research*, 40, 183-199.
- Fujiki, N., Naito, Y., Hirano, S., Kojima, H., Shiomi, Y., Nishizawa, S., Honjo, I. (2000). Brain activities of prelingually and postlingually deafened children using cochlear implants. *Annals of Otology, Rhinology and Laryngology (Suppl.)*, 185, 12-14.
- Gallese, V., Keysers, C., and Rizzolatti, G. (2004) A unifying view of the basis of social cognition. *Trends in Cognitive Sciences*, 8: 396-403
- Gallese, V. (2003) The manifold nature of interpersonal relations: The quest for a common mechanism. *Phil. Trans. Royal Soc. London*, 358: 517-528
- Gallese, V., Fadiga, L., Fogassi, L. and Rizzolatti, G. (1996). Action recognition in the premotor cortex. *Brain* 119, 593-609
- Geffner, D. (1980). Feature characteristics of spontaneous speech production in young deaf children. *Journal of Communication Disorders*, 13, 443-454.
- Geers, A.E. (2006). Factors influencing spoken language outcomes in children following early cochlear implantation. *Advances in Otorhinolaryngology*, 64, 50-65.
- Geers, A.E. (2004). Speech, language, and reading skills after early cochlear implantation. *Archives of Otolaryngology-Head and Neck Surgery*, 130, 634-638.
- Geers, A.E., & Moog, J.S. (1990). *Early Speech Perception Test*. St-Louis central institute for the deaf.
- Giraud, A.L.; Price, C.J., Graham, J.M., Frackowiak, R.S.J. (2001). Functional plasticity of language-related brain areas after cochlear implantation. *Brain*, 124 (7), 1307-1316.

- Graf Estes, K., Evans, J.L., Alibali, M.W., Saffran, J.R. (2007) Can infants map meaning to newly segmented words? Statistical segmentation and word learning. *Psychological Science*, 18, 254-260
- Green, J.R., Moore, C.A., Higashikawa, M., Steeve R.W. (2000). The physiologic development of speech motor control: lip and jaw coordination. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 43, 239-255
- Green, J.R. (1998). *Physiologic Development of Speech Motor Control: Articulatory Coordination of Lips and Jaw*. Dissertation at the University of Washington.
- Gold T (1980). Speech production in hearing-impaired children. *Journal of Communication Disorders*, 13, 397-418.
- Guenther, F.H., Hampson, M., & Johnson, D. (1998). A theoretical investigation of reference frames for the planning of speech movements. *Psychological Review*, 105(4), 611-633.
- Haith, M.M., Benson, J.B., Roberts Jr., R.J., Pennington, B.F. (1994). Visual expectations as the first step toward the development of future-oriented. Dans Haith, M.M., Benson, J.B., Roberts Jr., R.J., Pennington, B.F. (Eds.), *The Development of Future-Oriented Processes*. 1994 Series: (MF) The John D. and Catherine T. MacArthur Foundation Series on Mental Health and Development.
- Hare, G. (1983). Development at 2 years. Dans J. Irwin et S. Wong (Eds.), *Phonological Development in Children: 18-72 months*. Carbondale, IL: Southern Illinois University Press.
- Harrison, R.V., Gordon, K.A., Mount, R.J. (2005). Is there a critical period for cochlear implantation in congenitally deaf children? Analyses of hearing and speech perception performance after implantation. *Developmental Psychobiology*, 146, 252-261.
- Hartmann, R., Shepherd, R.K., Heid, S., & Klinke, R. (1997). Response of the primary auditory cortex to electrical stimulation of the auditory nerve in the congenitally deaf white cats. *Hearing Research*, 112, 115-133.
- Hasenstab M, Tobey E. Language development in children receiving Nucleus multichannel cochlear implants. *Ear Hear*.1991;12(suppl):55S-65S.

- Hertz-Pannier, L., Chiron, C., Lambertz, G. (2003). Imagerie du langage chez l'enfant. *Methods in neuropsychology: applications to the study of memory and language. INSERM, 142*, 1-9.
- Hertz-Pannier, L., Chiron, C., Jambaqué, I., Kieffer-Renaux, V., Van de Moortele, P.F., Delalande, O., Fohlen, M., Brunelle, F., Le Bihan, D. (2002). Late plasticity for language in a child's non dominant hemisphere : A pre and post-surgery fMRI study. *Brain*, 125, 361-372.
- Hudgins, C. & Numbers, F. (1942). An investigation of the intelligibility of the speech of the deaf. *Genetic Psychology Monographs*, 25, 289-392.
- Hubel, D.H. & Wiesel, T.W. (1970). Cell sensitive to binocular depth in area 18 of the macaque monkey cortex. *Nature*, 25, 41-42.
- Huttenlocher, P. R. (1990). Morphometric study of human cerebral cortex development. *Neuropsychologia* 28, 517-27.
- Ingram D. (1976). *Phonological disability in children*. Elsevier: New York. 167p.
- Innocenti, G.M., & Frost, D.O. (1979). Effects of visual experience on the maturation of the efferent system to the corpus callosum. *Nature*, 280, 231-234.
- Ito, J., Iwasaki, Y., Sakakibara, J., & Yonekura, Y. (1993). Positron emission tomography of auditory sensation in deaf patients and patients with cochlear implants. *Annals of Otolaryngology, Rhinology, and Laryngology*, 102, 797-801.
- Johnson, J. & Newport, E. (1989). Critical period effects in second language learning: The influence of maturational state on the acquisition of English as a second language. *Cognitive Psychology*, 21, 60-99.
- Jusczyk, P.W., & Derrah, C. (1987). Representation of speech sounds by young infants. *Developmental Psychology*, 23, 648-654
- Jusczyk, P.W. (1985). On characterizing the development of speech perception. Dans Mehler, J. & Fox, R. (Eds.). *Neonate Cognition: Beyond the Blooming, Buzzing, Confusion*. Norwood, N.J., Ablex.
- Katz, W. F., Kripke, C., & Tallal, P. (1991). Anticipatory coarticulation in the speech of adults and young children: Acoustic, perceptual and video data. *Journal of Speech and Hearing Research*, 34, 1222-1232.

- Kent, R.D. (1997). Speech motor models and developments in neurophysiological science: New perspectives. Dans Hulstijn, W., Peters, H.F., & Van Lieshout, P. (Eds.) *Speech Production: Motor Control, Brain Research and Fluency Disorders*. Netherlands, Elsevier, 13-36.
- Kent R.D., Osberger M.J, Netsell, R., Goldschmidt Hustedde C. (1987). Phonetic development in identical twins differing in auditory function, *Journal of Speech and Hearing Research*, 52, 64-75
- Kent, R. D., & Bauer, H. (1985). Vocalizations of 1-year-olds. *Journal of Child Language*, 12, 491-526.
- Kent, R. D. (1983) The Segmental Organization of Speech. Dans P. F. MacNeilage (Ed.) *The Production of Speech*. New York: Springer-Verlag.
- Kent, R. D. & Murray, A. D. (1982). Acoustic features of infant vocalic utterances at 3, 6 and 9 months. *Journal of the Acoustical Society of America*, 72, 353-365.
- Kirk, K.I., Ying, E., Miyamoto, R.T., O'Neill, T., Lento, C.L., & Fears, B. (2002). Recruitment of the auditory cortex in congenitally deaf cats by long-term cochlear electrostimulation. *Science*, 285, 1729-1733.
- Kirk, K.I., Diefendorf, E., Riley, A., Osberger, M.J. (1995). Consonant production by children with multichannel cochlear implants or hearing aids. *Advances in Otorhinolaryngology*, 50, 154-159.
- Kirk, K.I., Hill-Brown, C. (1985). Speech and language results in children with a cochlear implant. *Ear and Hearing*, 6 (Supp), 36-47.
- Klinke, R., Kral, A., Heid, S., Tillein, J., Hartmann, R. (1999). Recruitment of the auditory cortex in congenitally deaf cats by long-term cochlear electrostimulation. *Science*, 285 (5434): 1729-1733.
- Koopmans-Van beinum, F.J, et van der Stelt, J. (1986). Early stages in the development of speech movements", in Lindblom, B. et Zetterstrom, R. (Eds), *Precursors of Early Speech*, New York, Stockton Press, pp. 37-49.
- Kral, A., Hartman, R., Tillein, J., Heid, S. & Klinke, R. (2001). Delayed maturation and sensitive periods in the auditory cortex. *Audiology and Neuro-Otology*, 6, 346-362.

- Kuhl, P. K. (1995). Mechanisms of developmental change in speech and language. *Proceedings of the International Congress of Phonetic Sciences*, Stockholm, 2, 132-139.
- Kuhl, P. K. (1992). Speech prototypes : Studies on the nature, functions, ontogeny and phylogeny of the « centers » of speech categories. in Tohkura, Y., Vatikiotisbateson, E. ET Sagisaka, Y. (Eds.), *Speech perception, production and linguistic structure*, Tokyo, Ohmsha, 239-264.
- Kuhl, P. K. & Meltzoff, A. N. (1996). Infant vocalizations in response to speech: Vocal imitation and developmental change. *Journal of the Acoustical Society of America*, 100, 2425-2438.
- Kuhl, P. K. & Meltzoff, A. N. (1988). Speech as an intermodal object of perception. Dans *Perceptual Development in Infancy: The Minnesota Symposia on Child Psychology*. Yonas A. (Ed.), Erlbaum, Hillsdale, N.J. 20, pp. 235-266.
- Kuhl, P. K. & Meltzoff, A. N. (1984). The intermodal representation of speech in infants. *Infant Behavioral Development*, 7, 361-81.
- Kuhl, P. K. & Meltzoff, A. N. (1982). The bimodal perception of speech in infancy. *Science*, 218, 1138-1141.
- Lalevée, C. (2003). *Développement du contrôle de la production de parole, du cadre proto-syllabique vers la syllabe: suivi audio-visuel de 2 enfants de 6 à 12 mois*. Mémoire de DEA, Institut de la Communication Parlée, Université Stendhal, Grenoble III.
- Leake, P.A., Snyder, R.L., Hradek, G.T, Rebscher, S.J. (1995). Consequences of chronic extracochlear electrical stimulation in neonatally deafened cat. *Hearing Research*, 81, 65-80.
- Leake, P.A., Snyder, R.L., Hradek, G., & Rebscher, S. (1992). Chronic intracochlear electrical stimulation in neonatally deafened cats: Effects of intensity and stimulating electrode location. *Hearing research*, 64, 99-117.
- Leake, P.A. Hradek, G.T., Rebscher, S.J., Snyder, R.L. (1991). Chronic intracochlear electrical stimulation induces selective survival of spiral ganglion neurons in neonatally deafened cats. *Hearing Research*, 54, 251-71.
- Lecanuet, J.P. (2000). L'audition foetale. *Journal de Puériculture*, 6, 349-35.

- Lecanuet, J.P. (1997). The potentiality of the foetus. *Neuropsychologia*, 1, 107-110.
- Lecanuet, J-P., Granier-Deferre, C., Jacquet, A-Y., Caponi, I and Ledru, L. (1993). Prenatal discrimination of a male and a female voice uttering the same sentence. *Early development and Parenting*, 2, 217-228.
- Lecanuet, J.P., Granier-Deferre, C. & Schaal (1993). La sensorialité fœtale. *Les Cahiers de l'Afrée*, 5, 49-42.
- Lecours, A.R. (1982). Myelogenetic correlated of the development of speech and language. Dans F.H. Lenneberg, E. Lenneberg (Eds.) *Foundations of Language Development: a Multidisciplinary Approach*, University Press, New York, pp. 75-94.
- Lee, D.S., Lee, J.S., Oh, S.H., Kim, S.-K., Kim, J.-H., Ching, J.-K., Lee, M.C., Kim, C.S. (2001). Cross-modal plasticity and cochlear implants. *Nature*, 409, 149-50.
- Lenneberg, E.H. (1967). *Biological Foundations of Language*. New York : John Wiley & Sons, inc.
- Legerstee, M. (1990). "Infant use multimodal information to imitate speech sounds", *Infant behavior and development*, 13, 343-354.
- Lieberman, Philip (1980). On the Development of Vowel Production in Young Children. Dans (Eds). Grace H. Yeni-Komshian, James F. Kavanagh, Charles A. Ferguson. *Child Phonology Volume 1: Production*. New York: Academic Press, 113-42
- Ling, D. (1980). *Phonetic level speech evaluation*. Montreal: McGill University Instructional Communication Centre
- Locke, J.L. (1983). *Phonological Acquisition and Change*, New York: Academic Press
- Locke, J. L. & Pearson, D. M. (1992). Vocal learning and the mergence of phonological capacity: A neurobiological approach. Dans Ferguson, C. A., Menn, L. et Stoel-Gammon, C. (Eds), *Phonological Development: Models Research Implications*, Maryland, York Press, 91-129.
- Loizou, P.C. (1998). Mimicking the human ear. *IEEE Signal Processing Magazine*, 15(5), 101-130.
- Lorenz, K. 1965. *Evolution and modification of behavior*. Chicago: University of Chicago Press.

- Lousteau, R.J. (1987). Increased spiral ganglion cell survival in electrically stimulated, deafened guinea pig cochleae. *Laryngoscope*, 97, 836-42.
- Lundy, J.E.B. (1999). Theory of mind development in deaf children. *Perspectives in Education and Deafness*, 18, 1-5.
- Lustig, L.R., Leake, P.A., Snyder, R.L., Rebscher, S.J. (1994). Changes in cat cochlear nucleus following neonatal deafening and chronic intracochlear electrical stimulation. *Hearing Research*, 74, 29-37.
- MacNeilage, P.F., & Davis, B. (1990). Acquisition of speech production: Frames then content. Dans M. Jeannerod (Ed.), *Attention and performance XIII. Motor representation and control* (pp.453-476). New York: Lawrence Erlbaum Associates.
- MacWhinney B. (2000). The CHILDES project: tools for analyzing talk: NJ: Lawrence Erlbaum
- MacWhinney B. & Snow C.E. (1991). *CHILDES Manual*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- MacWhinney B. & Snow C.E. (1985). The Child Language Data Exchange System (CHILDES). *Journal of Child Language*, 12, 271-296.
- Manrique, M., Cervera-Paz, F.J., Huarte, A. & Molina, M. (2004). Advantage of cochlear implantation in prelingual deaf children before 2 years of age compared with later implantation. *Laryngoscope*, 114(8), 1462-69.
- Manrique, M., Cervera-Paz, F.J., Huarte, A., Perez, N., Molina, M., Garcia-Tapia, R. (1999). Cerebral auditory plasticity and cochlear implants. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 49 (Suppl): S193-S197.
- Marcotte, A.C., Morere, D.A. (1990). Speech lateralization in deaf populations : evidence for a developmental critical period. *Brain and Language*, 39, 134-152.
- Marinova-Todd, S. F., Marshall, D. B. & Snow, C. (2000). Three misconceptions about age and L2 learning. *TESOL Quarterly*, 34, 1, 9-31.
- Markides, A. (1970). The speech of deaf and partially hearing children with special reference to factors affecting intelligibility. *British Journal of Disorders of Communication*, 5, 126-140.
- Massaro, D.W. (1984). Children's perception of visual and auditory Speech. *Child Development*, 55, 1777-1788.

- Matsushima, J.I., Shepherd, R.K., Seldon, H.L., Su, S.A., Clark, G.M. (1991). Electrical stimulation of the auditory nerve in deaf kittens: effects on cochlear nucleus morphology. *Hearing research*, 56, 133-42.
- Mayberry, R. (1993a). The importance of childhood to language acquisition: evidence from American Sign Language. Dans J.C. Goodman, & H.C. Nusbaum (Eds), *The development of speech perception: The transition from speech sounds to spoken words*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Mayberry, R.I., & Lock, E. (2003). Age constraints on first versus second language acquisition: evidence for linguistic plasticity and epigenesis. *Brain and Language*, 87, 369-384.
- Mehler, J., Jusczyk, P.N., Lambertz, G., Halsted, N., Bertoncini, J., Amiel-Tison, C. (1988). A precursor of language acquisition in young infants, *Cognition*, 29, 143-178.
- Menn, L. (1983). Development of articulatory, phonetic and phonological capabilities. In B. Butterworth (Ed.). *Language production*. London: Academic Press.
- Mc Caffrey, H.A., Davis B.L., Mac Neilage P.F., Von Hapsburg D., 1998, "Multichannel cochlear implantation and the organization of early speech", *The Volta Review*, 101 (1), 5-29
- McGurk, H., & Mac Donald, J., 1976, « Hearing lips and seeing voices », *Nature*, 264, 746-748
- Mehler J., Jusczyk, P.W., Lambertz, G., Halsted, N., Bertoncini, J., Amiel-Tison, C. (1988) *A precursor of language acquisition in young infants. Cognition*, 29, 143-178
- Meltzoff, A.N. (1988). Infant imitation and memory: Nine-month-olds in immediate and deferred tests. *Child Development*, 59, 217-225.
- Meltzoff, A.N, & Moore, M.K (1983). Newborn infants imitate adult facial gestures. *Child Development*, 54, 702-709.
- Meltzoff, A.N, & Moore, M.K (1977). Imitation of facial and manual gestures by human neonates. *Science*, 198, 75-78.
- Michel, G. F., & Moore, C. L. (1995). *Developmental psychobiology*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Millot, J.L. & Filiaire, J.C. (1992). Les modifications de la fréquence cardiaque du nouveau-né en réponse à des stimulations acoustiques spécifiques et non spécifiques.

Bulletin d'Audiophonologie : Annales Scientifiques, Médecine et Pharmacie. Université de Franche-Comté, 154, 247-254.

- Mintz, T (2003). Frequent frames as a cue for grammatical categories in child directed speech. *Cognition*, 90, 91-117.
- Miyamoto, R.T., Kirk, K.I., Svirsky, M.A., & Seghal, S.T. (1999). Communication skills in pediatric cochlear implant recipients. *Acta Oto-Laryngologica*, 119, 215-222.
- Miyamoto R.T., Svirsky M., Kirk K.I., Robbins, A.M., Todd, S., Riley, A.I. (1997). Speech intelligibility of children with multichannel cochlear implants. *Annals of Otorhinolaryngology*, 106, 35-36.
- Miyamoto, R.T., Kirk, K.I., Robbins, A.M., Todd, S., & Riley, A. (1996). Speech perception and speech production skills of children with multichannel cochlear implants. *Acta Oto-Laryngologica*, 116, 240-3.
- Mohammad, J.A., Makhdoum, M., Snik, F.M., van den Broek, P. (1997). Cochlear implantation in deaf children. *Annals of Saudi Medicine*, 17, 5, 533-39.
- Mogford, K. (1988). Lip-reading in the prelingually deaf. Dans Bishop, B, Mogford, K.(Eds). *Language Development in Exceptional Circumstances*. Edinburgh, New York, Churchill Livingstone, 313p
- Mondain, M., Sillon, M., Vieu, A., Lanvin, M., Reuillard-Artieres, F., Tobey, E., & Uziel, A. (1997). Speech perception skills and speech production intelligibility in French children with prelingual deafness and cochlear implants. *Archives of Otolaryngology- Head and Neck Surgery*, 123, 181-184.
- Monsen, R.B. (1981). The oral speech intelligibility of hearing-impaired talkers. *Journal of Speech and Hearing Disorders*, 48, 286-296.
- Moody, M., Schwartz, R.G., Gravel, J.S., Wallace, I.F., Ellis, M.A., Lee, W.W. (1996). Speech perception and verbal memory in children with otitis media. Dans M.L. Casselbrant, D. Lim & C.D. Bluestone (Eds.) *Recent Advances in Otitis Media: Proceedings of the 6th International Symposium* (pp.339-342). Toronto: BC, Decker.
- Moore, J.K. (2002). Maturation of human auditory cortex: implication for speech perception. Eighth symposium on cochlear implants in children. *Annals of Otolaryngology and laryngology*, 112 (suppl 189), 7-10.

- Morrisson, J.A., & Shriberg, L.D. (1992). Articulation testing versus conversational speech sampling. *Journal of Speech and Hearing Research*, 35, 259-273.
- Naito, Y., & Honjo, I. (2000). Verbal self-monitoring in deaf subjects using cochlear implants. *Cochlear Implants International*, 1, 45-54.
- Newport, E. (1990). Maturation constraints on language learning. *Cognitive Science*, 14, 11-28.
- Neville, H.J., Schmidt, A. & Kutas, M. (1983). Altered visual-evoked potential in congenitally deaf adults. *Brain Research*, 266, 127-132.
- Nittrouer, S. (1995). Children learn separate aspects of speech production at different rates: Evidence from spectral moment. *Journal of the Acoustical Society of America*, 97(1), 520-30.
- Nittrouer, S. (1993). The emergence of mature gestural patterns is not uniform: Evidence from an acoustic study. *Journal of Speech and Hearing Research*, 36, 959-972.
- Nittrouer, S., Studdert-Kennedy, M., & McGowan, R. (1989). The emergence of phonetic segments: Evidence from the spectral structure of fricative-vowel syllables. *Journal of Speech and Hearing Research*, 32, 120-132.
- Nishimura, H., Hashikawa, K., Doi, K., Iwaki, T., Watanabe, Y., Kusuoka, H., Nishimura, T., & Kubo, T. (1999). Sign language "heard" in the auditory cortex. *Nature*, 397, 116.
- Nober, E.H. (1967). Vibrotactile sensitivity of deaf children to high intensity sound. *Laryngoscope*, 77, 2128-2146.
- Notoya, M., Suzuki, S., & Furukawa, M. (1996). Cochlear implant on a child with acquired deafness. *Nippon Jibiinkoka Gakkai Kaiho*, 99, 379-84.
- Oller, D.K. (1978). Infant vocalization and the development of speech. *Allied Health and Behavioral Science*, 1, 523-49.
- Ollers, D.K., Eilers, R.E. (1988). The role of audition in infant babbling, *Child Development*, 59, 441-449
- O'Donoghue, G.M., Nikolopoulos, T.P., Archbold, S.M., & Tait, M. (1999). Cochlear implants in young children: The relationship between speech perception and speech intelligibility. *Ear and Hearing*, 20, 419-425.

- Osberger, M.J., Zimmerman-Phillips, S., & Koch, D.B. (2002). Cochlear implant candidacy and performance trends in children. *Annals of Otology, Rhinology and Laryngology*, 111, 271-288.
- Osberger, M.J., Robbins, A.M., Todd, S.L., & Riley, A.I., Miyamoto, R.T. (1994). Speech intelligibility of children with cochlear implants. *Volta Review*, 96 (5), 169-180.
- Osberger, M.J., Maso, M., & Sam, L.S. (1993). Speech intelligibility of children with cochlear implants, tactile aids, or hearing aids. *Journal of Speech and Hearing Research*, 36, 186-203.
- Osberger, M. J., Robbins, A. M., Berry, S. W., Todd, S. L., Hesketh, L. J., & Sedey, A. (1991b). Analysis of the spontaneous speech samples of children with cochlear implants or tactile aids. *American Journal of Otology*, 12(Suppl.), 151-164.
- Osberger, M.J., & McGarr, N.S. (1982). Speech production characteristics of the hearing-impaired, *Speech and language : advances in basic research and practice*, 8, pp. 221-283.
- Owens, E. & Blazek, B. (1985). Visemes observed by hearing-impaired and normal hearing adult viewers. *Journal of Speech and Hearing Research*, 28: 381-393.
- Oyama, S. (1979). The concept of the sensitive period in developmental studies. *Merrill-Palmer Quarterly*, 25, 83-103.
- Parschall, L. (1983). Development at 18 months. Dans J.Irwin & S. Wong (Eds.), *Phonological Development in Children: 18-72 months*. Carbondale, IL: Southern Illinois University Press.
- Piaget, J. (1954). *The construction of reality in the child*. New York, Ballantine.
- Penfield, W. & Roberts, J. (1959). *Speech and brain mechanisms*. Princeton, NJ.: Princeton University Press.
- Perier, O., Alegria, J. & Buyse, M. (1984). Consequences of auditory deprivation in animals and in humans. *Acta Oto-laryngologica*, 111, 263-268.
- Perkell, J.S., Guenther, F., Lane, H., Matthies, M.L., Stockmann, E., Tiede, M. & Zandipour, M. (2004). The distinctness of speakers' productions of vowel contrasts is related to their discrimination of the contrasts. *Journal of the Acoustic Society of America*, 116: 2338-44.

- Perkell, J.S. (1986). Coarticulation strategies: Preliminary implications of a detailed analysis of lower lip movements, *Speech Communication* 5, No. 2, 47-68.
- Peterson, C. C. & Siegal, M. (1995). Deafness, conversation, and theory of mind. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 36, 459-474.
- Petitto, L.A. & Marentette, P. (1991). Babbling in the manual mode: Evidence for the ontogeny of language, *Science*, 251, 1483-1496.
- Polka, L. & Werker, J.F. (1994). Developmental changes in perception of non-native vowel contrasts. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 20, 421-35.
- Ponton, C.W., & Eggermont, J.J. (2001). Of kittend ans kids: altered cortical maturation following profound deafness and cochlear implant use. *Audiology and Neuro-Otology*, 6(6), 363-380.
- Ponton, C.W., Don M., Eggermont, J.J., Waring, M.D., Masuda, A. (1996). Maturation of human cortical auditory function :differences between normal-hearing children and children with cochlear implants. *Ear and Hearing*, 17, 430-437.
- Poole, I., (1934). Genetic development of articulation of consonants sounds in speech. *Elementary English Review*, 11, 159-161.
- Prather, E.M., Hedrick, D.L., & Kern, C.A. (1974). Articulation development in children aged two to four years. *Journal of Speech and Hearing Disorders*, 11, 179-191.
- Pulvermüller, F. & Schumann, J.H. (1994). Neurobiological mechanisms of language acquisition. *Language Learning*, 44, 681-734.
- Querleu, D., Renard, S., Versyp, F. (1981). Les perceptions auditives du fœtus humain. *Medecine et Hygiene*, 39, 2101-10.
- Rauscheker, J.P. (1995). Compensatory plasticity and sensory substitution in the cerebral cortex. *Trends in Neuroscience*, 18, 36-43.
- Rizzolatti, G., Fogassi, L. & Gallese, V. (2001) Neurophysiological mechanisms underlying the understanding and imitation of action. *Nature Neuroscience Reviews*, 2, 661-670
- Rizzolatti, G., Fadiga, L., Gallese, V. and Fogassi, L. (1996): Premotor cortex and the recognition of motor actions. *Cognitive Brain Research*, 3, 131-141.

- Robert-Ribes, J. (1995). *Models of audiovisual integration*, Thèse doctorale, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- Robbins, A. M., Bollard, P. M., & Green, J. (1999). Language development in children implanted with the CLARION cochlear implant. *Annals of Otology, Rhinology, & Laryngology*, 177 (Suppl.) : 113-118.
- Robbins, A.M., Kirk, K.I., Osberger, M.J., & Ertmer, D. (1995). Speech intelligibility of implanted children. *Annals of Otology, Rhinology and Laryngology, Supp 166*, 399-401.
- Robinshaw, H.M. (1996). Acquisition of speech, pre- and post-cochlear implantation: longitudinal studies of a congenitally deaf infant, *European Journal of Disorders of Communication*, 31, 121-139
- Rosenblum, L.D., Shmuckler, M.A., Johnson, J.A (1997). The McGurk effect in infants. *Perception & Psychophysics*, 59, (3), 347-357
- Rough, I., Landberg, I. & Lundberg, L.J.(1989). Phonetic development in early infancy: A study of four Swedish children during the first eighteen months of life. *Journal of Child Language*, 16, 19-40.
- Ruben, R.J., & Rapin, I. (1980). Plasticity of the developing auditory system. *Annals of Otology, Rhinology, and Laryngology*, 89, 303-311.
- Rymer, R. (1992). The Silent Childhood, Parts I and II, *The New Yorker*.
- Saffran, J.R., Aslin, R.N., & Newport, E.L. (1996). Statistical learning by 8-month old infants. *Science*, 274, 1926-1928.
- Samar, V.J., Metz, D.E. (1988). Criterion validity of speech intelligibility rating-scale procedures for the hearing-impaired population. *Journal of Speech, Language and Hearing Research*, 31, 307-316.
- Sander, E.K. (1972). When are speech sounds learned?. *Journal of Speech and Hearing Disorders*, 37, 55-63.
- Sehgal S.T., Kirk K.I., Svirsky M., Ertmer D.J., Osberger M.J. (1998). Imitative consonant feature production by children with multichannel sensory aids. *Ear and Hearing* 19(1), 72-83
- Selby, J.C., Robb, M.P., & Gilbert, H.R. (2000). Normal vowel articulations between 15 and 36 months of age. *Clinical Linguistics & Phonetics*, 14 (4), 255-265.

- Seliger, H. W. (1978): The implications of a multiple critical period hypothesis for second language learning. Dans W. C. Ritchie (Ed.): *Second language acquisition research. Issues and implications*. New York: Academic Press, 11-19.
- Serry, T.A., & Blamey, P.J. (1999). A 4-year investigation into phonetic inventory development in young cochlear implant users. *Journal of Speech, Language, and Hearing research*, 42, 141-154.
- Sharkey, S.G., & Folkins, J.W. (1985). Variability of jaw and lip movements in children and adults: Implications of the development of speech motor control. *Journal of Speech and Hearing Research*, 28, 8-15.
- Sharma, A., Dorman, M.F., Kral, A. (2005). The influence of a sensitive period on central auditory development in children with unilateral and bilateral cochlear implants. *Hearing Research*, 203, 134-143.
- Sharma, A, Dorman M, Spahr A, Todd NW (2002). Early cochlear implantation in children allows normal development of central auditory pathways. Eighth symposium on cochlear implants in children. *Annals of Otology, Rhinology and laryngology*, 112 (suppl 189), 38-41
- Shepherd, R.K., Hartmann, R., Heid, S., Hardie, N., Klinke, R. (1997). The central auditory system and auditory deprivation: experience with cochlear implants in congenitally deaf. *Acta Oto-Laryngologica (Suppl.)*, 532, 28-33.
- Singleton, D. (2007). The critical period hypothesis: some problems. *Interlingüística*, 17, 48-56.
- Singleton, D. (1989). *Language Acquisition: The Age Factor*, Clevedon, Multilingual Matters
- Skuse, D.H. (1984a). Extreme deprivation in early childhood. I: Diverse outcomes for three siblings from an extraordinary family. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 25, 523-541.
- Skuse, D.H. (1984b). Extreme deprivation in early childhood II: Theroetical issues and comparative review. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*.
- Smith, C.R. (1975). Residual hearing and speech production in deaf children. *Journal of Speech and Hearing Research*, 18, 795-811.

- Smith, A. & Goffman, L. (1998). Stability and patterning of speech movement sequences in children and adults. *Journal of Speech, Language and Hearing Research*, 41, 18-30.
- Spencer, P.E. (2004). Individual differences in language performance after cochlear implantation at one to three years of age: Child, family, and linguistic factors. *Journal of Deaf Studies and Deaf Education*, 9, 395-412.
- Staller, S.J., Beiter, A.L., Brimacombe, J.A., Mecklenburg, D.J., & Arndt, P. (1991). Pediatric performance with the Nucleus 22-Channel Cochlear Implant System. *American Journal of Otology (Suppl.)*, 12, 126-136.
- Stark, R. E., Bleile, K., Brandt, J., Freeman, J., and Vining, E. P. (1995). Speech-language outcomes of hemispherectomy in children and young adults. *Brain and Language*, 51, 406-421.
- Stark, R.E. (1983): Phonatory development in young normally hearing and hearing impaired children. Dans: I. Hochberg, H. Levitt et M.J. Osberger (Eds), *Speech of the hearing impaired: Research, training and personal preparation*. Baltimore: Universtiy Park Press: 251-266.
- Stoel-Gammon, C. (1987). The phonological skills of two-year- olds. *Language, Speech, and Hearing Services in Schools*, 18,
- Stoel-Gammon C. (1985). Phonetic inventories, 15-24 months: a longitudinal study. *Journal of Speech and Hearing Research*, 1985 28(4), 505-12
- Stoel-Gammon, C., Kehoe, M.M. (1994). Hearing impairment in infants and toddlers: Identification, vocal development, intervention. In J. E. Bernthal & N. W. Bankson (Eds.) *Child Phonology: Characteristics, Assessment, and Intervention with Special Populations*. New York: Thieme Medical Publishers, Inc
- Stoel-Gammon, C., & Herrington, P.B. (1990). Vowel systems of normally developing and phonologically disordered children. *Clinical Linguistics & Phonetics*, 4 (2), 145-160.
- Stoël-Gammon, C (1988). Prelinguistic vocalizations of hearing-impaired and normally hearing subjects: a comparison of consonantal inventories. *Journal of Speech and Hearing Research*, 53, 302-315.

- Stoël-Gammon, C. & Otomo, K. (1986). Babbling development of hearing-impaired and normally hearing subjects. *Journal of Speech and Hearing Research*, 51 (1), 33-41.
- Stoël-Gammon, C., & Cooper, J.A. (1984). Pattern of early lexical and phonological development, *Journal of Child Language*, 11, 2, 247-271.
- Studdert-Kennedy, M. (1991). Language development from an evolutionary perspective. Dans Krasnegor, N. A., Rumbaugh, D. M., Schiefelbusch, R. L., & Studdert-Kennedy, M. (Eds.), *Biological and behavioral determinants of language development*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Summerfield, A.Q., & Marshall, D.H. (1995). Preoperative predictors of outcomes from cochlear implantation in adults: performance and quality of life. *Annals of Otolaryngology, Rhinology, and Laryngology*, 106, 105-8.
- Svirsky, M., Robbins, A.M., Kirk, K.I., Pisoni, D.B., & Miyamoto, R.T. (2000). Language development in profoundly deaf children with cochlear implants. *Psychological Science*, 11, 153-158.
- Svirsky, M.A., Teoh, S.N., Neuburger, H. (2004). Development of language and speech perception in congenitally profoundly deaf children in function of age at implantation. *Audiology & Neurotology* 9 (4), 224-233.
- Telfeian, A.E., Berqvist, C., Danielak, C., Simon, S.L., Duhaime, A.C. (2002) Recovery of language after hemispherectomy in a sixteen-year-old girl with late onset seizures. *Pediatric Neurosurgery*, 37, 19-21.
- Templin, M.C. (1957). Certain language skills in children: Their development and interrelationships. *Institute of child welfare monographs*, 26. Minneapolis: University of Minnesota Press.
- Thal, D. & Clancy, B. (2001). Brain development and language learning: Implications for prevention of non-biologically based language-learning disorders. *Journal of Speech-Language Pathology and Audiology*. 25: 52-76.
- Theoret, H., Merabet, L., & Pascual-Leone, A. (2004). Behavioral and neuroplastic changes in the blind: evidence for functionally relevant cross-modal interactions. *Journal of Physiology (Paris)*, 98, 221-233.

- Tobey EA, Geers AE, Brenner C, Altuna D, Gabbert G (2003). Factors associated with development of speech production skills in children implanted by age five. *Ear and Hearing*, 24, S36-S45.
- Tobey, E., Angelette, S., Murchison, C., Nicosia, J., Sprague, S., Staller, S., Brimacombe, J.A., & Beiter, A.L. (1991). Speech production performance in children with multichannel cochlear implants. *American Journal of Otology*, 12(Suppl.), 165-173.
- Tobey, E.A., Geers, A.E., & Brenner, C. (1994). Speech production results: Speech feature acquisition. *The Volta Review*, 96(5), 109-129.
- Tobey E.A. & Hasenstab, S. (1991). Effects of a Nucleus multichannel cochlear implant upon speech production in children. *Ear and Hearing*, 12(4 Suppl):48S-54S
- Tobey E.A., Pancamo S., Staller S.J., Brimacombe J.A., Beiter A.L. (1991b). Consonant production in children receiving a multichannel cochlear implant. *Ear Hearing*, 12(1), 23-31.
- Tomblin, J.B., Barker, B.A., Spencer, L.J., Zhang, X., Gantz, B.J. (2005). The Effect of Age at Cochlear Implant Initial Stimulation on Expressive Language Growth in Infants and Toddlers. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 48, 853-867.
- Trainor, L.J (2005). Are there critical periods for musical development. *Developmental Psychobiology*, 46 (3), 262-278.
- Truy E, & Lina G (2003). Implantation cochléaire de l'enfant: Technologie, bilan médical et sélection des candidats, réhabilitation. *Archives de pédiatrie*, 10, 554-564.
- Truy, E., Deiber, M.P., Cinotti, L., Mauguiere, F., Froment, J.C., & Morgan, A. (1995). Auditory cortex changes in long-term sensorineural deprivation during crude cochlear electrical stimulation: Evaluation by positron emission tomography. *Hearing Research*, 86, 34-42.
- Tyler, R.S., & Summerfield A.Q. (1996). Cochlear implantation: relationships with research on auditory deprivation and acclimatization. *Ear and Hearing*, 17(3), 38S-50S.
- Tye-Murray, Spencer, & Woodworth (1995). Acquisition of speech by children who have prolonged cochlear implant experience. *Journal of Speech and Hearing Research*, 38, 327-337.

- Tye-Murray, N., & Iler Kirk, K. (1993). Vowel and diphthong production by young users of cochlear implants and the relationship between the Phonetic Level Evaluation and spontaneous speech. *Journal of Speech and Hearing Research*, 36, 488-502.
- Vauclair, J. (2004). *Développement du jeune enfant. Motricité, Perception, Cognition*. Paris : Berlin.
- Vihman, M. (1996). Phonological development. *The origins of language in the child*. Cambridge, MA: Blackwell.
- Vihman, M. & Miller, R. (1988). Words and babble at the threshold of language acquisition. Dans M.D. Smith, & J.L. Locke (Eds.), *The Emergent Lexicon: The Child's Development of a Linguistic Vocabulary*. Academic Press: New York.
- Vinter, S. (1994). L'émergence du langage de l'enfant déficient auditif. Des premiers sons aux premiers mots. Paris: Masson.
- Waltzman, S.B., Fisher, S.G., Niparko, J.K., Cohen, N.L., (1995). Predictors of postoperative performance with cochlear implants. *Annals of Otology, Rhinology and Laryngology*, 104 (Suppl. 166); 15-18.
- Waltzman, S., Cohen, N.L., Spivak, L., Ying, E., Brackett, D., Shapiro, W. & Hoffman, R. (1990). Improvement in speech perception and production abilities in children using a multichannel cochlear implant. *Laryngoscope*, 100, 240-243.
- Watkins KE, Strafella AP, Paus T. (2003) Seeing and hearing speech excites the motor system involved in speech production. *Neuropsychologia*. 200, 989-94
- Wattendorf, E., Westermann, B., Zappatore, D., Franceschini, R., Lüdi, G., Radü, E.W., Nitsch, C. (2001). Different languages activate different subfields in Broca area. *Neuroimage* 6, 624.
- Webster, D.B., & Webster, M. (1979). Effects of neonatal conductive hearing loss on brain stem auditory nuclei. *Annals of Otology, Rhinology, and Laryngology*, 88, 684-688.
- Wellman, B., Case, I., Mengert, I., Bradbury, D. (1931). Speech sounds of young children. University of Iowa study. *Child Welfare*, 5.
- Werker, J.F. & Tees, R.C. (2005). Speech perception as a window for understanding plasticity and commitment in language systems of the brain. *Developmental Psychobiology*, 46(3), 233-251.

- Werker, J.F, Tees, R.C. (1984). Cross-language speech perception: Evidence for perceptual reorganization during the first year of life. *Infant Behavior and Development*, 7, 49-63.
- Yakowlev, P.I., & Lecours, A.R. (1967). *The Myetologenic Cycles of Regional Maturation of the Brain in Early Life*. Blackwell, Oxford, pp.3-70.
- Yoshinaga-Itano, C., Coulter, D., & Thomson, V. (2000). The Colorado newborn hearing screening project: effects on speech and language development for children with hearing loss. *Journal of Perinatology (Suppl.)*, 20, 132-137.
- Yoshinaga-Itano, C., Stredler-Brown, A., Jancosek, B (1992). From phone to phoneme, What can we understand from babble. *The Volta Review*, 94: 283-314.
- Zeng, F.G. (2004). Trends in cochlear implants. *Trends in Amplification*, 8(1), 1-34.